

Thomas S. Kuhn
La struttura
delle rivoluzioni scientifiche



Biblioteca Einaudi

Thomas S. Kuhn

La struttura delle rivoluzioni scientifiche

traduzione di Adriano Carugo



Einaudi

Titolo originale: *The Structure of Scientific Revolutions*

© 1962 by The University of Chicago

Traduzione di Adriano Carugo

Seconda edizione

Indice.

Prefazione.

I. Introduzione: un ruolo per la storia.

II. La via verso la scienza normale.

III. La natura della scienza normale.

IV. La scienza normale come soluzione di rompicapo.

V. La priorità dei paradigmi.

VI. L'anomalia e l'emergere delle scoperte scientifiche.

VII. La crisi e l'emergere di teorie scientifiche.

VIII. La risposta alla crisi.

IX. La natura e la necessità delle rivoluzioni scientifiche.

X. Le rivoluzioni come mutamenti della concezione del mondo.

XI. La invisibilità delle rivoluzioni.

XII. La soluzione delle rivoluzioni.

XIII. Progresso attraverso le rivoluzioni.

Prefazione

Il saggio che segue costituisce il primo rapporto completo pubblicato concernente un progetto che era stato originariamente concepito quasi quindici anni fa. A quel tempo stavo facendo studi postuniversitari di fisica teoretica ed ero già prossimo a terminare la mia dissertazione di dottorato. La fortunata occasione di essere impegnato in un corso sperimentale di fisica tenuto all'interno di un college e indirizzato a non-scienziati mi mise in contatto per la prima volta con la storia della scienza. Con mia grande sorpresa, quella presa di contatto con teorie e pratiche scientifiche antiche mise in crisi alcune delle mie concezioni fondamentali sulla natura della scienza e le ragioni del suo particolare successo.

Queste concezioni erano quelle che avevo precedentemente tratte in parte dalla mia stessa educazione scientifica e in parte da una vecchia passione per la filosofia della scienza. Nonostante l'utilità pedagogica e l'astratta plausibilità di quelle nozioni, per una ragione o per l'altra esse si rivelarono del tutto inadeguate ai compiti indicati dalla ricerca storica. Tuttavia esse avevano, ed hanno tuttora, un'importanza fondamentale per molte discussioni scientifiche, e sembrò perciò che valesse la pena studiare le ragioni del loro difetto di verosimiglianza. Il risultato fu un drastico mutamento di indirizzo nei miei progetti professionali, che si spostarono dalla fisica alla storia della scienza e quindi, gradualmente, da problemi storici relativamente definiti, di nuovo a quei più generali interessi filosofici che mi avevano inizialmente orientato verso la storia. Fatta eccezione per pochi articoli, questo saggio è il primo mio lavoro pubblicato nel quale quei miei originali interessi sono dominanti. In una certa misura è un tentativo per spiegare a me stesso e ai miei amici come mi sia capitato di essere trascinato dalla scienza alla sua storia.

Tre anni passati come Junior Fellow della Society of Fellows of Harvard University mi diedero per la prima volta l'opportunità di condurre una ricerca approfondita attorno ad alcune delle idee qui presentate. Senza quel periodo di libertà, il passaggio ad un nuovo campo di studi sarebbe stato molto più difficile e, forse, non sarebbe stato condotto a termine. In quegli anni parte del mio tempo fu dedicato alla storia della scienza propriamente detta. In particolare, continuai a studiare gli scritti di Alexandre Koyré e mi imbattei per la prima volta in quelli di Emile Meyerson, Hélène Metzger ed Anneliese Maier {01}. Questo gruppo di autori ha mostrato più chiaramente di quanto abbiano fatto la maggior parte degli altri studiosi recenti, che cosa significasse pensare scientificamente in un periodo in cui i canoni del pensiero scientifico erano molto diversi da quelli in uso al giorno d'oggi. Sebbene personalmente nutra dubbi sempre maggiori su alcune delle loro particolari interpretazioni storiche, i loro lavori, assieme a quello di A. O. Lovejoy, *Great Chain of Being*, hanno avuto una influenza, seconda soltanto a quella delle fonti originarie, nel modellare la mia concezione di ciò che può essere la storia delle idee scientifiche.

Ho dedicato gran parte del mio tempo in questi anni ad esplorare campi che non hanno una evidente relazione con la storia della scienza, ma nei quali la ricerca apre oggi problemi simili a quelli sui quali la storia aveva richiamato la mia attenzione. Una nota a piè di pagina, in cui mi ero imbattuto per caso, mi ha guidato verso gli esperimenti coi quali Jean Piaget ha illuminato sia i vari mondi attraverso a cui passa il bambino durante il suo sviluppo, sia il processo di transizione dall'uno all'altro di essi {02}. Uno dei miei colleghi mi ha fatto leggere articoli sulla psicologia della percezione, in particolare degli psicologi della *Gestalt*; un altro mi ha introdotto alle speculazioni di B. L. Whorf intorno all'effetto che il linguaggio ha sulla visione del mondo; e W. V. O. Quine mi ha aperto gli occhi sui trabocchetti filosofici della distinzione analitico-sintetica {03}. È questa quella sorta di esplorazione senza scopo preciso che la Society of Fellows permette di fare; ed è soltanto grazie ad essa che ho potuto imbattermi nella monografia quasi sconosciuta di Ludwik Fleck, *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache* (Basel 1935), un saggio che anticipa molte delle mie idee. Per merito del lavoro di Fleck, come anche grazie ad un'osservazione

fatta da un altro Junior Fellow, Francis X. Sutton, mi sono reso conto che poteva essere necessario inquadrare quelle idee nella sociologia della comunità scientifica. Anche se i lettori non troveranno, nelle pagine seguenti, che pochi riferimenti sia a questi lavori che a quelle conversazioni, il mio debito nei loro riguardi ha una portata che supera le mie attuali capacità di ricostruirlo o di valutarlo.

Durante il mio ultimo anno come Junior Fellow, un invito a tenere un corso di lezioni presso il Lowell Institute di Boston mi offerse la prima occasione per mettere alla prova la mia nozione ancora embrionale di scienza. Il risultato fu una serie di otto lezioni pubbliche, tenute durante il marzo del 1951, su *The Quest for Physical Theory*. L'anno successivo cominciai ad insegnare storia della scienza in senso specifico e, per quasi dieci anni, i problemi derivanti dall'insegnare in un campo che non avevo mai studiato sistematicamente mi lasciarono poco tempo per articolare in maniera esplicita le idee che mi avevano avvicinato ad essa per la prima volta. Per fortuna, però, quelle idee si dimostrarono suscettibili di suggerire un orientamento implicito e un certo modo di strutturare i problemi a gran parte del mio insegnamento ad un livello più avanzato. Devo perciò essere grato ai miei studenti per le preziose indicazioni che mi hanno dato sia circa la possibile vitalità delle mie idee, sia circa le tecniche più appropriate per comunicarle in maniera efficace. I medesimi problemi ed il medesimo orientamento danno unità alla maggior parte degli studi, prevalentemente storici ed apparentemente diversi, che ho pubblicato a partire dalla fine della mia *fellowship*. Parecchi di essi trattano del ruolo integrante svolto da questa o quella metafisica nella ricerca scientifica creativa. Altri studi esaminano il modo in cui le basi sperimentali di una nuova teoria vengono accumulate e assimilate da uomini vincolati a una teoria più vecchia e incompatibile. In questo processo essi descrivono quel tipo di sviluppo che, nelle pagine che seguono, ho chiamato l'«emergere» di una nuova teoria o di una nuova scoperta. In aggiunta a ciò vi sono altre connessioni di questo genere.

Lo stadio finale dello sviluppo di questa monografia coincise con un invito a risiedere, durante l'anno 1958-59, presso il Center for Advanced Studies in the Behavioral Sciences. Ancora una volta fui così in grado di concentrare tutta la mia attenzione sui problemi discussi nelle pagine seguenti. E, cosa ancor più

importante, il fatto di trascorrere un anno in una comunità composta prevalentemente da studiosi di scienze sociali mi mise di fronte a problemi inaspettati, relativi alle differenze esistenti tra comunità di questo tipo e quelle degli studiosi di scienze naturali in mezzo ai quali ero stato educato. In particolare, fui colpito dal numero e dalla portata dei casi di aperto disaccordo tra gli studiosi di scienze sociali circa la natura dei problemi e dei metodi scientifici legittimi. Sia la storia che l'esperienza mi facevano dubitare che, per questo tipo di domande, coloro che avevano pratica di scienze naturali avessero risposte più definitive o più permanenti dei loro colleghi operanti nel campo delle scienze sociali. Tuttavia per una ragione o per l'altra, la pratica dell'astronomia, della fisica, della chimica o della biologia, di solito non riesce ad evocare quelle controversie sui principi che oggi sembrano spesso endemiche, per esempio, fra gli psicologi e fra i sociologi. Mentre cercavo di scoprire la fonte di questa differenza, fui portato a riconoscere il ruolo che, nella ricerca scientifica, svolgono quelli che da allora ho chiamato i «paradigmi». Con tale termine voglio indicare conquiste scientifiche universalmente riconosciute, le quali, per un certo periodo, forniscono un modello di problemi e soluzioni accettabili a coloro che praticano un certo campo di ricerca. Una volta che questo pezzo del mio rompicapo fu sistemato al posto giusto, cominciò subito ad emergere un abbozzo di questo saggio.

Non è necessario che stia qui a rifare la storia delle successive revisioni di questo primitivo abbozzo; devo però spendere qualche parola a proposito della forma che esso ha conservato attraverso queste revisioni. Fin tanto che una prima versione non fu condotta a termine e largamente riveduta, prevedevo che il manoscritto sarebbe stato pubblicato soltanto come uno dei fascicoli della *Encyclopedia of Unified Science*. Furono gli editori di questa opera pionieristica che per primi mi commissionarono il saggio, che in seguito mi tennero fermamente legato al mio impegno e che infine stettero ad aspettare il risultato con un tatto e una pazienza eccezionali. Mi sento profondamente obbligato verso di loro, e particolarmente verso Charles Morris, per avermi pungolato coi necessari stimoli e per avermi dato consigli riguardo al manoscritto che ne risultò. Le limitazioni di spazio dell'*Encyclopedia* mi hanno costretto, d'altra parte, a presentare le mie idee in una forma estremamente condensata e schematica.

Sebbene fatti successivi abbiano in qualche modo allentato queste restrizioni e reso possibile eseguire contemporaneamente la pubblicazione indipendente, la forma di questo lavoro resta quella di un saggio piuttosto che di un vero e proprio libro quale il mio argomento finirà col richiedere.

Poiché il mio obiettivo principale è quello di sollecitare un mutamento nel modo di percepire e di valutare dati familiari, il carattere schematico di questa prima presentazione non va considerato uno svantaggio. Al contrario, i lettori già preparati dalla loro stessa attività di ricerca al tipo di riorientamento che viene qui sostenuto troveranno la forma saggistica più suggestiva e al tempo stesso più facilmente assimilabile. Ma essa ha anche i suoi svantaggi, e questi possono giustificare il fatto che, proprio all'inizio, mi soffermi ad illustrare quale genere di estensione e di approfondimento spero alla fine di raggiungere in una versione più ampia. La documentazione storica disponibile è molto più vasta di quella che i limiti di spazio mi permettono di utilizzare nelle pagine seguenti. Inoltre, tale documentazione si può ricavare non solo dalla storia della fisica, ma anche da quella della biologia. La decisione di trattare in questa sede soltanto la scienze fisiche fu presa in parte per dare a questo saggio maggiore coerenza ed in parte sulla base della mia competenza attuale. In aggiunta a ciò, il concetto di scienza, che verrà qui sviluppato, indica la potenziale fecondità di numerosi nuovi indirizzi di ricerca sia storica che sociologica. Ad esempio, va studiato dettagliatamente il modo in cui le anomalie e le violazioni della previsione scientifica attirano sempre di più l'attenzione di una comunità scientifica; lo stesso dicasi dell'emergere di crisi che possono essere causate dai ripetuti insuccessi dei tentativi fatti per rendere l'anomalia conforme alla regola. Ed ancora: se ho ragione di ritenere che ogni rivoluzione scientifica altera la prospettiva storica della comunità che ne fa esperienza, allora quel mutamento di prospettiva dovrebbe avere conseguenze sulla struttura dei manuali e delle pubblicazioni scientifiche del periodo post rivoluzionario. Un effetto come questo - una modificata distribuzione della letteratura tecnica citata nelle note a piè di pagina dei rapporti scientifici - dovrebbe essere studiato come un possibile indice del verificarsi di rivoluzioni.

La necessità di condensare drasticamente la materia mi ha costretto a trascurare di discutere numerosi problemi

fondamentali. Ad esempio, la mia distinzione tra periodi pre e post paradigmatici nello sviluppo di una scienza è troppo schematica. Ciascuna delle scuole che competono fra loro nella fase iniziale di un periodo è guidata da qualcosa di molto simile ad un paradigma; in certe circostanze, che tuttavia ritengo molto rare, due paradigmi possono coesistere pacificamente in una fase più avanzata del periodo. Il semplice possesso di un paradigma non è un criterio del tutto sufficiente a caratterizzare la transizione di sviluppo discussa nel capitolo II. E, cosa ancor più importante, non ho detto nulla, fatta eccezione per brevi accenni casuali, sul ruolo del progresso tecnologico e delle condizioni esterne economiche, sociali e intellettuali per lo sviluppo delle scienze. Eppure, non è necessario andare al di là di Copernico e del calendario per scoprire che le condizioni esterne possono contribuire a trasformare una semplice anomalia in una fonte di crisi acuta. Lo stesso esempio dovrebbe illustrare il modo in cui le condizioni esterne alle scienze possono influire sulla gamma delle alternative a disposizione dell'uomo che cerca di por fine ad una crisi, proponendo questa o quella riforma rivoluzionaria {04}. Non credo però che una considerazione esplicita di fatti di questo genere modificherebbe le tesi centrali sviluppate in questo saggio; essa però aggiungerebbe certamente una dimensione analitica, di primaria importanza per capire il progresso scientifico.

Ultimo punto, e forse il più importante: la ristrettezza dello spazio ha drasticamente limitato la trattazione delle implicazioni filosofiche della concezione della scienza storicamente impostata che questo saggio presenta. Certo, implicazioni di questo genere esistono, ed ho cercato non solo di sottolinearle, ma anche di documentare le più importanti. Tuttavia, nel fare ciò mi sono di solito trattenuto dal discutere nei dettagli le varie posizioni assunte dai filosofi contemporanei sulle questioni relative. Dove parlo di scetticismo, più spesso faccio riferimento ad un atteggiamento filosofico piuttosto che a qualche sua espressione completamente articolata. Ciò può avere come conseguenza che alcuni di coloro che pensano ed operano all'interno di qualcuna di quelle posizioni articolate abbiano l'impressione che io non sia riuscito a cogliere il loro punto. Personalmente penso che la loro impressione sia sbagliata, ma non è scopo di questo saggio cercare di convincerli. Un simile tentativo avrebbe richiesto un libro più lungo e molto diverso da questo.

I frammenti autobiografici che aprono questa prefazione serviranno a pagare il tributo di gratitudine per la maggior parte del debito che riconosco di avere sia verso lavori di studiosi sia verso istituti che hanno congiuntamente contribuito a dare una forma al mio pensiero. Il resto di quel debito cercherò di ripagare mediante citazioni nelle pagine seguenti. Nulla di ciò che ho detto o dirò riuscirà, però, a dare più che una pallida idea del numero e della natura dei debiti personali che ho verso molti individui che con suggerimenti e critiche hanno, in una occasione od un'altra, sorretto ed orientato il mio sviluppo intellettuale. Troppo tempo è passato da quando le idee di questo saggio hanno cominciato a prendere forma: l'elenco di tutti coloro che possono trovare segni precisi della loro influenza in queste pagine avrebbe quasi la stessa estensione dell'elenco dei miei amici e conoscenti. In una situazione come questa, devo limitarmi a ricordare quelle poche più significative influenze che anche una labile memoria non riuscirà mai a dimenticare completamente.

Fu James B. Conant, allora presidente della Harvard University, ad introdurmi per la prima volta alla storia della scienza e a dar così avvio alla trasformazione della mia concezione circa la natura del progresso scientifico. Da allora egli si è sempre dimostrato generoso di idee, critiche e tempo, compreso il tempo necessario per leggere il primo abbozzo del mio manoscritto e suggerire modificazioni importanti. Leonard K. Nash, in collaborazione col quale ho tenuto per cinque anni il corso orientato storicamente che il dottor Conant aveva iniziato, mi è stato collaboratore ancor più attivo durante gli anni in cui le mie idee hanno cominciato a prender forma, e ne ho sentito fortemente la mancanza durante gli ultimi stadi del loro sviluppo. Fortunatamente, però, dopo la mia partenza da Cambridge, prese il suo posto nel ruolo di diapason creativo il mio collega di Berkeley Stanley Cavell. Il fatto che Cavell, un filosofo prevalentemente interessato all'etica ed all'estetica, fosse giunto a conclusioni così congruenti con le mie, è stato per me una costante fonte di stimolo e di incoraggiamento. Egli è inoltre l'unica persona con la quale sia riuscito ad esplorare le mie idee nella forma di frasi incomplete. Questa forma di comunicazione prova un intendimento reciproco, grazie al quale egli fu in grado di indicarmi la via per superare o aggirare alcuni grossi ostacoli che incontrai mentre preparavo la prima stesura del manoscritto. Una

volta che questa prima stesura fu abbozzata, molti altri amici mi hanno aiutato a darle una nuova forma. Mi perdoneranno, penso, se ricordo per nome soltanto quei quattro i cui contributi si rivelarono più profondi e decisivi: Paul K. Feyerabend di Berkeley, Ernest Nagel della Columbia University, H. Pierre Noyes del Lawrence Radiation Laboratory, ed il mio allievo, John L. Heilbron, che ha spesso lavorato in stretta collaborazione con me nel preparare la versione definitiva per la stampa. Ho trovato estremamente utili tutte le loro riserve e tutti i loro suggerimenti, ma non ho ragioni per credere (e ne ho qualcuna per dubitare) che essi o gli altri che ho citato prima approvino il manoscritto finale nella sua interezza.

Devo infine pagare un tributo di speciale riconoscimento ai miei genitori, a mia moglie ed ai miei bambini. Ciascuno di costoro, in forme che sarò probabilmente l'ultimo a riconoscere, ha dato il suo proprio contributo intellettuale al mio lavoro. Ma essi hanno anche, in gradi diversi, fatto qualcosa di più importante. Lo hanno, cioè, lasciato continuare ed addirittura hanno incoraggiato la mia devozione ad esso. Chiunque abbia lottato con un progetto come il mio comprenderà quanto esso abbia potuto costare loro in parecchie occasioni. Non so come ringraziarli.

T. S. K.

Berkeley, California, febbraio 1962.

Capitolo primo.

Introduzione: un ruolo per la storia

La storia, se fosse considerata come qualcosa di più che un deposito di aneddoti o una cronologia, potrebbe produrre una trasformazione decisiva dell'immagine della scienza dalla quale siamo dominati. Fino ad oggi questa immagine è stata ricavata, anche dagli stessi scienziati, principalmente dallo studio dei risultati scientifici definitivi quali essi si trovano registrati nei classici della scienza e più recentemente nei manuali scientifici, dai quali ogni nuova generazione di scienziati impara la pratica del proprio mestiere. È però inevitabile che i libri di tal genere abbiano uno scopo persuasivo e pedagogico: una concezione della scienza ricavata da essi non è verosimilmente più adeguata a rappresentare l'attività che li ha prodotti di quanto non lo sia l'immagine della cultura di una nazione ricavata da un opuscolo turistico o da una grammatica della lingua. Questo saggio cerca di mostrare che essi ci hanno portati a fraintendimenti fondamentali. Il suo scopo è quello di abbozzare una concezione assai diversa della scienza, quale emerge dalla documentazione storica della stessa attività di ricerca.

Neppure la storia però sarà in grado di produrre quella nuova concezione, se i dati storici continuano a venire cercati ed esaminati principalmente per rispondere a domande formulate in base agli stereotipi antistorici ricavati dai manuali scientifici. Questi, ad esempio, sembrano spesso implicare che il contenuto della scienza sia esemplificato unicamente dalle osservazioni, dalle leggi e dalle teorie descritte nelle loro pagine. Quasi altrettanto regolarmente, quei medesimi manuali sono stati letti come se dicessero che i metodi scientifici sono semplicemente quelli illustrati dalle tecniche manipolative usate per raccogliere i dati

manualistici, unitamente alle operazioni logiche impiegate a correlare quei dati alle generalizzazioni teoretiche del manuale. Ne è risultata una concezione della scienza, che ha avuto profonde implicazioni circa la sua natura ed il suo sviluppo.

Se la scienza è la costellazione di fatti, teorie e metodi raccolti nei manuali correnti, allora gli scienziati sono uomini che, con maggiore o minor successo, si sono sforzati di contribuire con uno o con un altro elemento a quella particolare costellazione. Lo sviluppo scientifico diventa così il processo frammentario, nel corso del quale questi elementi sono stati aggiunti, singolarmente o a gruppi, al deposito sempre crescente che costituisce la tecnica e la conoscenza scientifica. E la storia della scienza diventa la disciplina che fa la cronaca sia di questi incrementi successivi, sia degli ostacoli che hanno reso difficile la loro accumulazione. Allo storico che si occupa dello sviluppo scientifico sembrano quindi presentarsi due compiti principali. Da un lato, egli deve determinare da parte di chi ed in quale momento ciascun fatto, legge o teoria della scienza contemporanea fu scoperto o inventato. Dall'altro lato, deve descrivere e spiegare la congerie di errori, miti e superstizioni che hanno ostacolato un più rapido accumularsi degli elementi costitutivi dei testi scientifici moderni. Molte ricerche sono state dirette verso questi scopi, ed alcune lo sono tuttora.

Negli anni recenti, però, alcuni storici della scienza hanno trovato sempre più difficile adeguarsi ai compiti che il concetto di sviluppo per accumulazione assegna loro. Come cronisti di un processo incrementale, essi scoprono che ulteriori ricerche rendono più difficile, non più facile, rispondere a domande come: Quando fu scoperto l'ossigeno? Chi fu il primo a concepire l'idea di conservazione dell'energia? Alcuni di loro sospettano in mistura sempre maggiore che, semplicemente, è sbagliato fare domande di questo genere. Forse la scienza non si sviluppa per accumulazione di singole scoperte e invenzioni. Al tempo stesso, questi storici si trovano di fronte a crescenti difficoltà quando si tratta di distinguere la componente «scientifica» delle osservazioni e delle credenze del passato da ciò che i loro predecessori hanno affrettatamente etichettato come «errore» o «superstizione». Quanto più accuratamente essi studiano la dinamica aristotelica o la chimica del flogisto o la termodinamica del calorico, tanto per fare degli esempi, con tanta maggiore certezza essi hanno la

sensazione che le concezioni della natura che si erano affermate nel passato non fossero, considerate nel loro insieme, né meno scientifiche né il prodotto di idiosincrasie umane più di quanto lo siano quelle di moda oggi. Se queste credenze fuori moda si devono chiamare miti, allora i miti possono essere prodotti dallo stesso genere di metodi e sostenuti per lo stesso genere di ragioni che oggi guidano la ricerca scientifica. Se, d'altra parte, essi meritano il nome di scienza, allora la scienza ha incluso complessi di credenze abbastanza incompatibili con quelle che oggi sosteniamo. Date queste alternative, lo storico deve scegliere quest'ultima. Le teorie fuori moda non sono in linea di principio prive di valore scientifico per il fatto di essere state abbandonate. Una simile scelta, però, rende difficile guardare allo sviluppo scientifico come ad un processo di accrescimento. La ricerca storica stessa, che mette in luce le difficoltà derivanti dall'isolare singole invenzioni e scoperte, fa nascere profondi dubbi circa il processo cumulativo per cui, si pensava, questi contributi particolari alla scienza si sarebbero aggiunti gli uni agli altri.

Il risultato di tutti questi dubbi e difficoltà è stato una rivoluzione storiografica nello studio della scienza, rivoluzione che è ancora però ad uno stadio iniziale. Gradualmente, e spesso senza rendersene conto, gli storici della scienza hanno cominciato a porsi un nuovo genere di domande e a tracciare per le scienze linee di sviluppo differenti e spesso tutt'altro che cumulative. Piuttosto che andare a cercare, nella scienza di un'epoca passata, i contributi permanenti che quella ha apportato al nostro benessere attuale, essi si sforzano di presentare l'integralità storica di quella scienza considerata nel suo tempo. Essi, ad esempio, si pongono domande non circa un rapporto delle concezioni di Galileo con quelle della scienza moderna, ma piuttosto circa il rapporto tra le sue concezioni e quelle del suo gruppo, cioè dei suoi maestri, dei suoi contemporanei, e dei suoi successori immediati nel campo delle scienze. Inoltre sottolineano l'importanza di studiare le opinioni di quel gruppo e di altri gruppi simili dal punto di vista — di solito molto diverso da quello della scienza moderna — che dà a quelle opinioni la massima coerenza interna e la più stretta aderenza possibile alla natura. La scienza, considerata attraverso i lavori che seguono tale impostazione, i quali trovano forse la loro migliore esemplificazione negli scritti di Alexandre Koyré, appare come un'attività completamente diversa da quella discussa dagli

studiosi della vecchia tradizione storiografica. Questi studi storici suggeriscono, almeno implicitamente, la possibilità di una nuova immagine della scienza. Il presente saggio intende delineare tale immagine, rendendo esplicite alcune implicazioni della nuova storiografia.

Quale aspetto della scienza diventerà preminente nel corso di questo sforzo? Il primo, almeno in ordine di comparsa, è l'insufficienza delle direttive metodologiche a imporre da sole una unica conclusione sostanziale a molti tipi di questioni scientifiche. Incaricato di esaminare fenomeni elettrici o chimici, colui che è ignorante in questi campi, ma che è in possesso di un criterio di scientificità, può legittimamente raggiungere una qualsiasi conclusione fra le tante incompatibili fra loro. Fra queste legittime possibilità, le particolari conclusioni cui egli giunge sono probabilmente determinate dalla sua precedente esperienza in altri campi, dagli elementi accidentali della sua indagine, e dalla sua particolare formazione. Quali credenze circa le stelle, ad esempio, introduce nello studio della chimica o dell'elettricità? Quale, fra i molti esperimenti concepibili che sono rilevanti per il nuovo campo, decide di eseguire per primo? E quali aspetti del complesso fenomeno che ne risulta lo colpiscono come particolarmente rilevanti per chiarire la natura del mutamento chimico o della affinità elettrica? Per il singolo individuo, e talvolta anche per la comunità scientifica, risposte a domande come queste sono spesso determinanti essenziali dello sviluppo scientifico. Noteremo ad esempio nel capitolo II che i primi stadi di sviluppo della maggior parte delle scienze sono stati caratterizzati da una continua competizione tra numerose concezioni della natura, diverse le une dalle altre, ciascuna parzialmente derivata dai dettati dell'osservazione e del metodo scientifici, e tutte più o meno compatibili con essi. Ciò che differenziava le varie scuole non era questo o quel difetto di metodo — tutte erano «scientifiche» — ma ciò che chiameremo le loro incommensurabili maniere di guardare al mondo e di praticare la scienza in esso. L'osservazione e l'esperienza possono e debbono limitare drasticamente l'ambito delle credenze scientifiche ammissibili, altrimenti non vi sarebbe scienza; ma non sono in grado, da sole, di determinare un particolare insieme di tali credenze. Un elemento arbitrario, composto di accidentalità storiche e personali, è sempre presente, come elemento

costitutivo, nelle convinzioni manifestate da una data comunità scientifica in un dato momento.

Questo elemento di arbitrarietà non indica però che ogni gruppo scientifico qualsiasi potrebbe praticare il proprio mestiere senza un qualche insieme di credenze ricevute. Né rende meno logica la particolare costellazione nella quale il gruppo, ad un dato momento, si trova di fatto impegnato. La ricerca effettiva non comincia quasi mai prima che una comunità scientifica pensi di essere entrata in possesso di precise risposte a domande come: Quali sono le entità fondamentali da cui l'universo risulta composto? Come interagiscono tra di loro e coi sensi? Quali domande si possono legittimamente porre riguardo a tali entità e quali tecniche si possono impiegare per ottenere le risposte adeguate? Per lo meno nel caso delle scienze che hanno raggiunto uno stato di maturità, risposte a domande come queste (o loro sostituti completi) sono stabilmente incorporate nella iniziazione pedagogica che prepara gli studenti e li rende abili ad esercitare la loro professione. Poiché tale istruzione è al tempo stesso rigorosa e rigida, queste risposte finiscono con l'esercitare una profonda influenza sulla mentalità scientifica. La loro capacità di esercitare tale influenza è in gran parte responsabile sia della particolare efficacia dimostrata dall'attività della ricerca normale, sia della direzione in cui essa procede ad ogni dato momento. Quando esamineremo la scienza normale nei capitoli III, IV e V, finiremo col descrivere quel tipo di ricerca come uno strenuo e devoto tentativo di forzare la natura entro le caselle concettuali fornite dall'educazione professionale. Al tempo stesso ci chiederemo se la ricerca potrebbe andare avanti senza simili caselle, quale che sia l'elemento di arbitrarietà presente nelle loro origini storiche e, occasionalmente, nel loro successivo sviluppo.

Tuttavia questo elemento di arbitrarietà è presente, ed esso pure ha un importante effetto sullo sviluppo scientifico, come vedremo dettagliatamente nei capitoli VI, VII e VIII. La scienza normale, l'attività nella quale la maggior parte degli scienziati spendono inevitabilmente quasi tutto il loro tempo, è affermata sulla base della assunzione che la comunità scientifica sa che cosa è il mondo. Gran parte del successo dell'impresa deriva dalla volontà della comunità di difendere quella assunzione, se necessario ad un prezzo considerevole. La scienza normale, ad esempio, sopprime spesso novità fondamentali, perché esse

sovvertono necessariamente i suoi impegni basilari. Tuttavia, fin tanto che questi mantengono un elemento di arbitrarietà, la natura stessa della ricerca normale ci assicura che la novità non rimarrà soppressa per molto tempo. Talvolta un problema normale, cioè un problema che dovrebbe essere risolvibile per mezzo di regole e procedimenti noti, resiste al reiterato assalto dei più abili membri del gruppo entro la cui competenza viene a cadere. In altre circostanze, uno strumento dell'apparato di ricerca, progettato e costruito per gli scopi della ricerca normale, non riesce a funzionare nella maniera aspettata, rivelando una anomalia che, nonostante i ripetuti sforzi, non può venire ridotta a conformarsi all'aspettativa professionale. In questi ed in altri modi ancora, la scienza normale va a finire ripetutamente fuori strada. E quando ciò accade — quando cioè la professione non può più trascurare anomalie che sovvertono l'esistente tradizione della pratica scientifica — allora cominciano quelle indagini straordinarie che finiscono col condurre la professione ad abbracciare un nuovo insieme di impegni, i quali verranno a costituire la nuova base della pratica scientifica. Gli episodi straordinari nel corso dei quali avviene questa sostituzione degli impegni vincolanti i membri della professione, sono indicati in questo saggio col nome di rivoluzioni scientifiche. In rapporto all'attività legata alla tradizione della scienza normale, essi sono gli elementi complementari che scuotono la tradizione.

Gli esempi più evidenti di rivoluzioni scientifiche sono quei famosi episodi dello sviluppo scientifico che già in passato sono stati spesso indicati come rivoluzioni. Perciò nei capitoli IX e X, nei quali viene esaminata per la prima volta in modo specifico la natura delle rivoluzioni scientifiche, ci occuperemo a più riprese delle svolte fondamentali dello sviluppo scientifico legate ai nomi di Copernico, di Newton, di Lavoisier e di Einstein. Questi episodi mostrano in che cosa consistano tutte le rivoluzioni scientifiche più chiaramente di molti altri episodi, almeno per quanto riguarda la storia delle scienze fisiche. Ogni rivoluzione scientifica ha reso necessario l'abbandono da parte della comunità di una teoria scientifica un tempo onorata, in favore di un'altra incompatibile con essa; ha prodotto, di conseguenza, un cambiamento dei problemi da proporre all'indagine scientifica e dei criteri secondo i quali la professione stabiliva che cosa si sarebbe dovuto considerare come un problema ammissibile o come una soluzione

legittima di esso. Ogni rivoluzione scientifica ha trasformato la immaginazione scientifica in un modo che dovremo descrivere in ultima istanza come una trasformazione del mondo entro il quale veniva fatto il lavoro scientifico. Simili cambiamenti, assieme alle controversie che quasi sempre li accompagnano, sono le caratteristiche che definiscono le rivoluzioni scientifiche.

Queste caratteristiche emergono con particolare chiarezza, dallo studio per esempio della rivoluzione newtoniana o della rivoluzione chimica. È però una tesi fondamentale di questo saggio che tali caratteristiche possono venire rintracciate anche nello studio di molti altri episodi che non furono rivoluzionari in maniera così evidente. Nell'ambito del più ristretto gruppo della specializzazione che era interessata ad esse, le equazioni di Maxwell apparvero non meno rivoluzionarie di quelle di Einstein, e perciò incontrarono resistenze. La invenzione di nuove teorie suscita regolarmente, ed appropriatamente, la medesima reazione da parte di alcuni degli specialisti sulla cui sfera di competenza esse hanno ripercussioni. Per costoro, la nuova teoria implica un mutamento delle regole che governavano la precedente prassi della scienza normale e perciò, inevitabilmente, si ripercuote su gran parte del lavoro scientifico che essi hanno già compiuto con successo. Questa è la ragione per la quale una nuova teoria, per quanto specifica sia la sua sfera di applicazione, è raramente, o non è mai, soltanto un'aggiunta a ciò che è già noto. La sua assimilazione richiede la ricostruzione della teoria precedente e una nuova valutazione dei fatti precedentemente osservati, processo intrinsecamente rivoluzionario che raramente è condotto a termine da un unico uomo e che non può realizzarsi da un giorno all'altro. Non fa meraviglia che gli storici abbiano incontrato difficoltà nel datare con precisione questo processo prolungato, che il loro vocabolario li costringe a considerare come un elemento isolato.

Invenzioni teoriche nuove non costituiscono l'unico evento scientifico che abbia una ripercussione rivoluzionaria sugli specialisti della disciplina nel cui ambito essa ha luogo. Gli impegni che governano la scienza normale non specificano soltanto che genere di entità sono contenute nell'universo, ma anche, per implicazione, quelle che non lo sono. Ne consegue — sebbene questo punto richiederà un'ampia discussione — che una scoperta come quella dell'ossigeno o dei raggi X non aggiunge

semplicemente un elemento in più alla popolazione del mondo scientifico. In ultima istanza essa ha questo effetto, ma non prima che la comunità degli specialisti abbia valutato in modo nuovo i procedimenti sperimentali tradizionali, abbia modificato la sua concezione delle entità con le quali ha avuto familiarità per molto tempo, e, nel corso di questo processo, abbia riorientato l'impalcatura teorica attraverso la quale si mette in contatto col mondo. I fatti e le teorie scientifiche non possono essere separati in modo categorico, eccetto forse entro una singola tradizione di prassi della scienza normale. Questa è la ragione per la quale la scoperta inaspettata non è semplicemente fattuale nelle sue ripercussioni e la ragione per la quale il mondo dello scienziato è non solo quantitativamente arricchito ma anche qualitativamente trasformato da fondamentali novità sia teoriche che di fatto.

Questa concezione allargata della natura della rivoluzione scientifica è quella delineata nelle pagine che seguono. Dobbiamo ammettere che tale allargamento forza l'uso comune. Nondimeno, anche parlando di scoperte, continuerò ad usare il termine «rivoluzionarie», giacché è proprio la possibilità di stabilire una relazione tra la loro struttura e quella — tanto per fare un esempio — della rivoluzione copernicana che mi fa sembrare così importante la concezione allargata. La discussione che precede dà un'idea su come verranno sviluppate, nei nove capitoli che seguono immediatamente, le nozioni complementari di scienza normale e di rivoluzioni scientifiche. La parte rimanente del saggio tenta di risolvere le tre questioni centrali rimanenti. Il capitolo XI, discutendo la tradizione dei manuali, prende in considerazione le ragioni per le quali è stato così difficile in passato riconoscere le rivoluzioni scientifiche. Il capitolo XII descrive la lotta rivoluzionaria tra i sostenitori della vecchia tradizione della scienza «normale» ed i seguaci della nuova. Esso esamina così il processo che dovrebbe in qualche modo, in una teoria della ricerca scientifica, sostituire i procedimenti di conferma o di falsificazione resi familiari dalla nostra convenzionale immagine della scienza. La lotta tra sezioni della comunità scientifica è l'unico processo storico che abbia effettivamente avuto come risultato l'abbandono di una teoria precedentemente accettata o l'adozione di una nuova. Infine, il capitolo XIII porrà la questione di come uno sviluppo che viene realizzato attraverso rivoluzioni possa essere compatibile col

carattere apparentemente unitario del progresso scientifico. Riguardo a tale questione, però, questo saggio fornirà soltanto le indicazioni generali per la risposta, giacché questa dipende da caratteristiche della comunità scientifica che richiedono una esplorazione ed uno studio molto più approfonditi.

Senza dubbio alcuni lettori si saranno già chiesti se uno studio storico possa avere ripercussioni sul genere di trasformazione concettuale cui qui si tende. Abbiamo a disposizione un intero arsenale di dicotomie il quale ci suggerisce che esso non è propriamente in grado di fare ciò. La storia — si continua troppo spesso a ripetere — è una disciplina puramente descrittiva. Le tesi suggerite sopra, invece, sono spesso interpretative e talvolta normative. Inoltre, molte delle mie generalizzazioni concernono la sociologia o la psicologia sociale degli scienziati; tuttavia, almeno alcune delle mie conclusioni appartengono tradizionalmente alla logica o alla epistemologia. Nel paragrafo precedente può anche sembrare che abbia violato la distinzione contemporanea, molto importante, tra «il contesto della scoperta» e «il contesto della giustificazione». Che cosa, se non una profonda confusione, può essere indicata da questa mescolanza di campi e pertinenze diversi?

Avendo compiuto il mio svezzamento intellettuale a base di queste distinzioni e di altre simili, difficilmente potrei essere più cosciente della loro rilevanza e della loro forza. Per molti anni ho supposto che esse riguardassero la natura della conoscenza, e sono ancora dell'opinione che, riformulate in maniera appropriata, esse abbiano qualcosa d'importante da dirci. Tuttavia i miei tentativi di applicarle, sia pure in modo grossolano, alle circostanze effettive in cui la conoscenza viene conquistata, accettata ed assimilata, me le hanno fatte sembrare straordinariamente problematiche. Lungi dall'essere distinzioni logiche o metodologiche elementari, le quali sarebbero così anteriori all'analisi della conoscenza scientifica, esse appaiono ora parti integranti di un insieme tradizionale di risposte sostanziali, date proprio a quelle questioni sulle quali esse sono state proiettate. Una simile circolarità non diminuisce affatto la loro validità. Soltanto le rende parti di una teoria e, con ciò, le sottopone al medesimo esame che viene regolarmente applicato alle teorie in altri campi. Se il loro contenuto deve essere qualcosa di più di una pura astrazione, allora quel contenuto va scoperto

osservandole quando vengono applicate ai dati che esse hanno il compito di elucidare. Come potrebbe la storia della scienza non essere una fonte di fenomeni, ai quali le teorie concernenti la conoscenza possano essere legittimamente applicate?

Capitolo secondo.

La via verso la scienza normale

In questo saggio, ‘scienza normale’ significa una ricerca stabilmente fondata su uno o su più risultati raggiunti dalla scienza del passato, ai quali una particolare comunità scientifica, per un certo periodo di tempo, riconosce la capacità di costituire il fondamento della sua prassi ulteriore. Oggi tali punti fermi sono elencati, seppure raramente nella loro forma originale, dai manuali scientifici sia elementari che superiori. Questi manuali espongono il corpo della teoria riconosciuta come valida, illustrano molte o tutte le sue applicazioni coronate da successo e confrontano queste applicazioni con osservazioni ed esperimenti esemplari. Prima che questi testi diventassero popolari all'inizio del XIX secolo (e fino ad un periodo ancor più recente, per quanto concerne le scienze che solo da poco hanno raggiunto uno stadio maturo) molti famosi classici della scienza assolvevano tale funzione. La *Fisica* di Aristotele, l'*Almagesto* di Tolomeo, i *Principia* e l'*Ottica* di Newton, l'*Elettricità* di Franklin, la *Chimica* di Lavoisier e la *Geologia* di Lyell e molte altre opere servirono per un certo periodo di tempo a definire implicitamente i problemi ed i metodi legittimi in un determinato campo di ricerca per numerose generazioni di scienziati. Esse furono in grado di fare ciò poiché possedevano in comune due caratteristiche: i risultati che presentavano erano sufficientemente nuovi per attrarre uno stabile gruppo di seguaci, distogliendoli da forme di attività scientifica contrastanti con essi; e nello stesso tempo, erano sufficientemente aperti da lasciare al gruppo di scienziati costituitosi su queste nuove basi la possibilità di risolvere problemi d'ogni genere.

D'ora in avanti, per indicare i risultati che hanno in comune queste due caratteristiche, userò il termine ‘paradigmi’, che ha

una precisa relazione col termine 'scienza normale'. Con la scelta di questo termine ho voluto far presente il fatto che alcuni esempi di effettiva prassi scientifica riconosciuti come validi — esempi che comprendono globalmente leggi, teorie, applicazioni e strumenti — forniscono modelli che danno origine a particolari tradizioni di ricerca scientifica con una loro coerenza. Queste sono le tradizioni che lo storico descrive con etichette quali 'astronomia tolemaica' (o 'copernicana'), 'dinamica aristotelica' (o 'newtoniana'), 'ottica corpuscolare' (o 'ottica ondulatoria'). e così via. Lo studio dei paradigmi, inclusi molti che sono ampiamente più specializzati di quelli che abbiamo citati poco fa come esempi illustrativi, è ciò che principalmente prepara lo studente a diventare membro della particolare comunità scientifica con la quale più tardi dovrà collaborare. Dal momento che in tale comunità egli incontra scienziati che appresero i fondamenti della loro disciplina dagli stessi modelli concreti, la sua attività successiva raramente susciterà un aperto disaccordo riguardo ai principi fondamentali. Coloro la cui ricerca si basa sui paradigmi condivisi dalla comunità scientifica si impegnano ad osservare le stesse regole e gli stessi modelli nella loro attività scientifica. Questo impegno e l'evidente consenso che esso produce, sono requisiti indispensabili per una scienza normale, ossia per la genesi e per il mantenimento di una particolare tradizione di ricerca.

Poiché in questo saggio il concetto di paradigma sarà spesso usato al posto di una varietà di nozioni familiari, sarà necessario dire qualcosa di più circa le ragioni della sua introduzione. Perché il risultato scientifico concreto come punto focale dell'impegno che vincola i membri della professione, precede i vari concetti, leggi, teorie e punti di vista che si possono astrarre da essa? In che senso il paradigma condiviso dalla comunità è un'unità di misura fondamentale per lo studioso dello sviluppo scientifico, un'unità che non può venire completamente ridotta alle componenti logicamente atomiche che potrebbero funzionare al suo posto? Quando le incontreremo nel capitolo V, si dimostrerà essenziale rispondere a queste questioni e ad altre simili per capire sia la scienza normale, sia il concetto, ad essa associato, di paradigma. Questa discussione più astratta dipenderà, però, da una preliminare presa di contatto con esempi di scienza normale e di paradigmi visti nel loro funzionamento. In particolare, entrambi

questi concetti correlati tra loro verranno chiariti dalla osservazione che può esistere una specie di ricerca scientifica senza paradigmi o almeno senza paradigmi così univoci e così vincolanti come quelli citati sopra. L'acquisizione di un paradigma e del tipo di ricerca più esoterico che esso permette è un segno di maturità nello sviluppo di una disciplina scientifica.

Se lo storico ritraccia a ritroso nel tempo lo sviluppo della conoscenza scientifica di un qualsiasi gruppo scelto di fenomeni correlati tra loro, ha probabilità di trovarsi di fronte ad una leggera variante dello schema che qui illustriamo, in riferimento alla storia della fisica ottica. I manuali di fisica d'oggi insegnano allo studente che la luce è costituita di fotoni, cioè di entità della meccanica quantistica che presentano alcune proprietà caratteristiche delle onde ed altre proprietà caratteristiche delle particelle. La ricerca procede in accordo con tale impostazione, o meglio in accordo con la più elaborata caratterizzazione matematica dalla quale è derivata questa verbalizzazione corrente. Tale caratterizzazione della luce è, però, vecchia di appena mezzo secolo. Prima che essa fosse sviluppata da Planck, da Einstein e da altri all'inizio di questo secolo, i testi di fisica insegnavano che la luce era un movimento ondulatorio trasversale, concetto questo radicato in un paradigma che derivava in ultima analisi dagli scritti ottici Young e di Fresnel dell'inizio del XIX secolo. E, d'altra parte, la teoria ondulatoria non fu la prima ad essere abbracciata da quasi tutti gli scienziati la cui attività si svolgeva nel campo dell'ottica. Durante il XVIII secolo, il paradigma per questo campo fu fornito dall'*Ottica* newtoniana, che insegnava che la luce consisteva di corpuscoli materiali. A quel tempo, i fisici cercavano una prova della pressione esercitata dalle particelle luminose che venivano ad urtare contro corpi solidi {05}, prova che non cercarono i primi seguaci della teoria ondulatoria.

Queste trasformazioni dei paradigmi dell'ottica fisica costituiscono rivoluzioni scientifiche, ed il successivo passaggio da un paradigma all'altro attraverso la rivoluzione forma lo schema abituale di sviluppo di una scienza matura. Questo, però, non è lo schema caratteristico del periodo precedente l'opera di Newton, ed è questo contrasto che ci interessa qui. Nessun periodo situato tra la remota antichità e la fine del XVII secolo ha presentato un'unica concezione accettata da tutti circa la natura della luce. C'erano invece molte scuole e sotto-scuole in competizione tra loro: la maggior parte di esse difendevano questa o quella variante

della dottrina epicurea, aristotelica o platonica. Alcune affermavano che la luce consisteva di particelle emesse da corpi materiali; per altre si trattava di una modificazione del mezzo frapposto tra il corpo e l'occhio; altre ancora spiegavano la luce in termini di interazione del mezzo con una emanazione dell'occhio; e vi erano inoltre altre combinazioni e variazioni di queste teorie. Ciascuna delle rispettive scuole traeva forza dalla sua relazione con qualche metafisica particolare, e ciascuna metteva in rilievo, come osservazioni paradigmatiche, il particolare gruppo di fenomeni ottici che la sua teoria era maggiormente in grado di spiegare. Altre osservazioni venivano spiegate mediante elaborazioni ad hoc, oppure venivano lasciate in sospeso, considerandole problemi rilevanti da chiarire con una ricerca ulteriore {06}.

In vari momenti tutte queste scuole diedero significativi contributi al corpo di concetti, fenomeni, e tecniche da cui Newton trasse quello che fu il primo paradigma ad essere quasi uniformemente accettato nel campo dell'ottica fisica. Ogni definizione di scienziato che escluda anche i membri più creativi di queste varie scuole escluderà pure i loro successori moderni. Quegli uomini furono scienziati. Tuttavia chiunque esamini un panorama dell'ottica fisica prima di Newton può ben concludere che, sebbene coloro che svolgevano attività in quel campo fossero scienziati, il risultato puro e semplice della loro attività era qualcosa meno che scienza. Essendo in grado di non accettare come ovvio nessun corpo comune di opinioni, ciascun teorico di ottica fisica si sentiva spinto a ricostruire il suo campo dalle fondamenta. Nel fare ciò, la sua scelta delle osservazioni e degli esperimenti favorevoli era relativamente libera, giacché non v'era nessun insieme stabilito di metodi o di fenomeni che ogni studioso di ottica si sentisse costretto ad impiegare o a spiegare. In simili circostanze, il dialogo dei libri che ne risultavano era spesso diretto altrettanto ai membri delle altre scuole quanto alla natura. Uno schema di questo tipo si ritrova in numerosi campi creativi di oggi e non è incompatibile con scoperte ed invenzioni significative. Esso però è diverso dallo schema di sviluppo che l'ottica fisica ha acquisito dopo Newton e che altre scienze naturali rendono oggi familiare.

La storia delle ricerche sull'elettricità nella prima metà del XVIII secolo fornisce l'esempio più concreto e meglio noto del

modo in cui una scienza si sviluppa prima di acquisire il suo primo paradigma universalmente riconosciuto. Durante quel periodo, v'erano quasi altrettante concezioni circa la natura dell'elettricità quanti erano i più importanti sperimentatori in questo campo, come Hauksbee, Gray, Desaguliers, Du Fay, Nollet, Watson, Franklin ed altri. Le loro differenti concezioni circa l'elettricità avevano però qualche cosa in comune: esse derivavano parzialmente da questa o da quella versione della filosofia corpuscolare meccanicistica che dominava la ricerca scientifica di quel tempo. Inoltre erano tutte componenti di teorie scientifiche reali, cioè di teorie che almeno in parte erano state costruite sulla base di esperimenti e di osservazioni e che, in parte, determinavano la scelta e la interpretazione di ulteriori problemi presi in considerazione nel corso della ricerca. Tuttavia, sebbene gli esperimenti riguardassero tutti l'elettricità e la maggior parte degli sperimentatori leggessero gli uni le opere degli altri, le loro teorie presentavano poco più di una rassomiglianza di famiglia {07}.

Un primo gruppo di teorie stabilitesi in base all'attività di ricerca del XVII secolo, consideravano l'attrazione e la generazione per frizione come i fenomeni elettrici fondamentali. Esse tendevano a considerare la repulsione come un effetto secondario, dovuto ad una specie di rimbalzamento meccanico, ed a differire il più a lungo possibile la discussione e la ricerca sistematica circa l'effetto recentemente scoperto da Gray, ossia la conduzione elettrica. Altri «elettrici» (il termine è loro) ritenevano che l'attrazione e la repulsione fossero manifestazioni egualmente elementari dell'elettricità e modificarono di conseguenza le loro teorie e le loro ricerche. (In verità, questo gruppo era notevolmente ristretto; persino la teoria di Franklin non riuscì mai a dare una ragione completa della reciproca repulsione di due corpi dotati di carica negativa). Ma essi trovavano non meno difficile del primo gruppo spiegare contemporaneamente alcuni degli effetti, anche fra i più semplici, della conduzione. Questi effetti, però, fornivano il punto di partenza per un terzo gruppo, il quale tendeva a parlare di elettricità come di un «fluido» che poteva scorrere attraverso i conduttori, piuttosto che come di un «effluvio» che emanava dai non-conduttori. Questo gruppo, a sua volta, trovava difficile conciliare le proprie teorie con numerosi effetti di attrazione e di repulsione. Soltanto in seguito all'opera di Franklin e dei suoi

successori immediati venne fuori una teoria che poteva spiegare con eguale facilità quasi tutti questi effetti e che perciò poteva fornire, e fornì, ad una successiva generazione di «elettricisti» un paradigma comune per le loro ricerche.

Fatta eccezione per quelle discipline, come la matematica e l'astronomia, nelle quali i primi paradigmi stabili risalgono ad un periodo preistorico, ed anche per quelle, come la biochimica, che nacquero da una divisione e nuova combinazione di scienze specializzate già mature, le situazioni che abbiamo tracciate sopra sono storicamente tipiche. Sebbene ciò che sto per dire richiede da parte mia che continui ad usare la infelice semplificazione che appioppa ad un esteso periodo storico un nome unico e talvolta scelto arbitrariamente (come Newton e Franklin), direi che disaccordi fondamentali dello stesso tipo caratterizzarono, ad esempio, lo studio del movimento prima di Aristotele e della statica prima di Archimede, lo studio del calore prima di Black, della chimica prima di Boyle e Boerhaave e della geologia storica prima di Hutton. In certi settori della biologia — ad esempio, nel campo dello studio dell'ereditarietà — i primi paradigmi accolti universalmente sono ancor più recenti; e rimane ancora aperta la questione circa quali settori delle scienze sociali abbiano già acquisito definitivamente paradigmi di questo genere. La storia dimostra che il cammino verso un consenso duraturo nel campo della ricerca è straordinariamente arduo.

La storia indica anche però alcune ragioni che spiegano le difficoltà incontrate su quel cammino. In assenza di un paradigma o di un qualcosa che possa aspirare a diventare tale, può succedere che tutti i fatti che in qualche modo possono interessare lo sviluppo di una data scienza sembrino egualmente rilevanti. Ne consegue che la raccolta iniziale di fatti è un'attività molto più casuale di quella resa familiare dal successivo sviluppo scientifico. Inoltre, in mancanza di una ragione che spinga a cercare qualche forma particolare di informazione più recondita, la raccolta iniziale di fatti è di solito ristretta a quei dati che si trovano già a portata di mano. L'insieme di fatti in tal modo raccolti comprende quelli che sono accessibili all'osservazione casuale ed all'esperimento casuale insieme ad alcuni dati più esoterici che si possono ricavare per merito delle pratiche professionali consolidate quali la medicina, la redazione di almanacchi e la metallurgia. Poiché le tecniche professionali

rendono facilmente accessibili fatti che non avrebbero potuto essere scoperti casualmente, la tecnologia ha spesso giocato un ruolo vitale nella genesi di una nuova scienza.

Ma sebbene questo raccogliere fatti sia stata essenziale per l'origine di molte scienze importanti, chiunque esamini, ad esempio, gli scritti enciclopedici di Plinio o le storie naturali di Bacone del XVII secolo, scoprirà che esso porta ad impantanarsi. Si è un po' esitanti a chiamare scientifica la letteratura che ne risulta. Le «storie» baconiane del fuoco, del colore, del vento, delle estrazioni, e così via, sono piene di informazioni, alcune delle quali oscure. Ma esse giustappongono fatti che più tardi si dimostreranno rivelatori (ad esempio, il riscaldamento per mescolanza) ad altri fatti (ad esempio il calore dei cumuli di letame) che rimarranno per qualche tempo troppo complessi per poter essere completamente integrati nella teoria {08}. Oltre a ciò, dal momento che ogni descrizione non può che essere parziale, la tipica storia naturale, nei suoi resoconti immensamente circostanziati, spesso omette proprio quei particolari che scienziati di epoca posteriore troveranno particolarmente illuminanti. Quasi nessuna delle primitive «storie» dell'elettricità, ad esempio, accenna al fatto che una pagliuzza, attirata da un bastoncino di vetro strofinato, ne rimbalza via nuovamente. Questo effetto sembrava essere di natura meccanica, non elettrica {09}. Per di più, dal momento che la raccolta casuale di fatti raramente viene fatta per un tempo sufficiente e con strumenti adeguati che le permettano di essere critica, le storie naturali spesso giustappongono descrizioni come quelle menzionate sopra ad altre, come — tanto per fare un esempio — il riscaldamento per antiperistasi (o per raffreddamento), che oggi siamo del tutto incapaci di confermare {10}. Soltanto in occasioni molto rare, come nel caso della statica, della dinamica e dell'ottica geometrica antiche, fatti raccolti con così scarsa guida da parte di una teoria precedentemente stabilita parlano con sufficiente chiarezza da permettere l'emergere di un primo paradigma.

Questa è la situazione che crea le scuole caratteristiche dei primi stadi di sviluppo di una scienza. Nessuna storia naturale può venire interpretata in assenza di un insieme anche implicito di credenze metodologiche e teoretiche intrecciate tra loro che permetta la scelta, la valutazione e la critica. Se questo corpo di credenze non è già implicito nella raccolta di fatti — nel qual caso

abbiamo a disposizione qualcosa di più di «meri fatti» — esso deve essere fornito dall'esterno, forse da parte di una metafisica di moda, o da parte di un'altra scienza, oppure dai casi storici e personali. Non fa dunque meraviglia che, nelle prime fasi di sviluppo di ogni scienza, uomini diversi, trovandosi di fronte la stessa gamma di fenomeni, ma non di solito tutti gli stessi fenomeni particolari, li descrivano e li interpretino in maniere diverse. Ciò che sorprende e che forse si ritrova, in questa misura, soltanto nei campi che chiamiamo scientifici, è che simili divergenze iniziali debbano tosto in gran parte scomparire.

Di fatto, esse scompaiono quasi completamente e, a quanto pare, una volta per sempre. Inoltre, la loro scomparsa è di solito causata dal trionfo di una delle scuole già formatesi prima dello stabilimento di paradigmi, la quale, a causa delle credenze e dei preconconcetti che le erano caratteristici, metteva in rilievo soltanto qualche parte specifica della messe troppo vasta e caotica delle informazioni raccolte. Quei teoria dell'elettricità che ritenevano che l'elettricità fosse un fluido e perciò davano particolare importanza alla conduzione costituiscono un ottimo esempio che serve a illuminare questo punto. Guidati da tale credenza, che poteva difficilmente far fronte ai numerosi effetti di attrazione e di repulsione conosciuti, parecchi di essi concepirono l'idea di imbottigliare il fluido elettrico. Il frutto immediato dei loro sforzi fu la bottiglia di Leyda, un dispositivo che non avrebbe potuto mai essere scoperto da un uomo che esplorasse la natura a caso o alla cieca, ma che di fatto fu ideato indipendentemente da almeno due ricercatori poco dopo il 1740 {11}. Fin quasi dall'inizio delle sue ricerche nel campo dell'elettricità, Franklin fu particolarmente impegnato a spiegare quel dispositivo strano e, nel caso specifico, sommamente rivelatore. Il successo del suo tentativo fornì il più efficace degli argomenti che fecero della sua teoria un paradigma, anche se si trattava di un paradigma che non riusciva ancora a spiegare la maggior parte dei casi di repulsione elettrica allora conosciuti {12}. Per venire accettata come paradigma, una teoria deve sembrare migliore delle altre teorie in lizza, ma non deve necessariamente spiegare tutti i fatti coi quali ha a che fare, e di fatto non li spiega mai tutti.

Il paradigma di Franklin fece più tardi per l'intero gruppo dei teorici dell'elettricità quello che la teoria dell'elettricità come fluido aveva fatto per il sottogruppo che la sosteneva. Esso suggerì

quali esperimenti valesse la pena di eseguire e quali non erano consigliabili, perché diretti verso manifestazioni elettriche secondarie o troppo complesse. Soltanto il paradigma assolse a questa funzione con maggiore efficacia, in parte perché la fine della discussione tra le scuole pose termine alla costante «affermazione dei principi fondamentali, ed in parte perché la sicurezza di essere sulla giusta via incoraggiò gli scienziati ad affrontare ricerche più precise, più complesse e più costose {13}. Liberati dalla preoccupazione di tener conto di qualsiasi fenomeno elettrico, il gruppo compatto degli studiosi dell'elettricità poté investigare e approfondire maggiormente fenomeni appositamente selezionati, progettando per questo scopo una apparecchiatura molto specializzata usando questa apparecchiatura con maggiore perseveranza e sistematicità di quanto avessero mai fatto i loro predecessori. Sia la raccolta dei fatti che la articolazione della teoria diventarono attività altamente orientate. L'efficacia delle ricerche elettriche crebbe di conseguenza, fornendo una prova dell'acuto detto metodologico di Francesco Bacone: «La verità emerge più facilmente dall'errore che dalla confusione» {14}.

Esamineremo nel prossimo capitolo la natura di questa ricerca altamente orientata e basata su paradigmi, ma prima dobbiamo considerare brevemente in che modo l'emergere di un paradigma incide sulla struttura del gruppo che svolge la propria attività nel campo relativo. Allorché, nel corso dello sviluppo di una scienza naturale, un individuo od un gruppo costruiscono per la prima volta una sintesi capace di attrarre la maggior parte dei ricercatori della generazione successiva, le vecchie scuole gradualmente scompaiono. La loro scomparsa è in parte causata dalla conversione dei loro membri al nuovo paradigma. Ma vi sono sempre alcuni che rimangono attaccati all'una o all'altra delle vecchie concezioni; essi potranno essere conosciuti negli ambienti esterni alla loro disciplina, mentre nel loro campo la loro opera da quel momento in poi viene ignorata. Il nuovo paradigma implica una nuova e più rigida definizione del campo. Coloro che sono restii o incapaci di adattare ad esso la loro ricerca devono continuare isolati o devono aggregarsi a qualche altro gruppo {15}. Storicamente, essi si sono spesso semplicemente sistemati nei dipartimenti di filosofia dove sono nate tante scienze specializzate. Come suggeriscono queste indicazioni, talvolta è proprio la

accettazione di un paradigma che trasforma un gruppo precedentemente interessato soltanto allo studio della natura in una specializzazione o, almeno, in una disciplina. Nelle scienze (sebbene non in campi come la medicina, la tecnologia, e il diritto, dei quali la principale *raison d'être* è un'esigenza sociale esterna), la nascita di giornali specializzati, la fondazione di società di specialisti e la pretesa di uno speciale riconoscimento nel curriculum hanno solitamente seguito l'accettazione di un singolo paradigma da parte del gruppo. O almeno questo è avvenuto dal tempo in cui, un secolo e mezzo fa, lo schema istituzionale della specializzazione scientifica si sviluppò per la prima volta, fino al tempo, molto vicino a noi, in cui l'armamentario della specializzazione ha acquistato un prestigio tutto suo.

Una più rigida definizione del gruppo scientifico ha altre conseguenze. Quando il singolo scienziato può accettare un paradigma come vero non ha più bisogno, nelle sue opere più importanti, di tentare di ricostruire il suo campo dai fondamenti, cominciando dai primi principi e giustificando l'uso di ogni concetto introdotto. Questo compito può essere lasciato al compilatore di manuali. Dato un manuale, però, lo scienziato creativo può cominciare la sua ricerca dal punto in cui quello finisce e concentrarsi così esclusivamente sugli aspetti più sottili e complessi dei fenomeni naturali che interessano il suo gruppo. E quando egli fa ciò, i resoconti della sua ricerca cominceranno a cambiare in maniera la cui evoluzione è stata studiata troppo poco, ma i cui moderni prodotti finali sono visibili a tutti e sgradevoli per molti. Le sue ricerche non saranno più esposte all'interno di libri indirizzati, come gli *Experiments... on Electricity* di Franklin o l'*Origine delle specie* di Darwin, a chiunque possa essere interessato all'argomento. Saranno invece esposte, di norma, in brevi articoli indirizzati soltanto a colleghi della stessa specializzazione, cioè ad uomini che si può ammettere che conoscano il paradigma comune e che si dimostrano gli unici in grado di leggere gli articoli loro indirizzati.

Nelle scienze di oggi i libri sono di solito o manuali o riflessioni retrospettive su l'uno o l'altro aspetto della vita scientifica. Lo scienziato che scrive ha maggiore probabilità di veder danneggiata la propria reputazione professionale che di accrescerne il prestigio. Soltanto nei primi stadi di sviluppo delle varie scienze, anteriori allo stabilimento dei paradigmi, il libro

aveva di solito la stessa relazione con la posizione raggiunta nella professione che sussiste ancora in altri campi creativi. E soltanto in questi campi che conservano ancora il libro, con o senza l'articolo, come veicolo per comunicare i risultati della ricerca, le linee della specializzazione scientifica sono delineate ancora così vagamente che il profano può sperare di seguirne il progresso leggendo le comunicazioni originali degli specialisti. Sia nella matematica che nell'astronomia, le comunicazioni dei risultati della ricerca hanno cessato fin dall'antichità di essere intelligibili ad un pubblico con una cultura generica. Nel campo della dinamica, la ricerca diventò similmente esoterica alla fine del Medioevo, ed essa riacquistò intelligibilità generale solo per breve tempo all'inizio del XVII secolo, allorché un nuovo paradigma sostituì quello che aveva guidato la ricerca medievale. La ricerca nel campo dell'elettricità cominciò a richiedere una traduzione per il profano prima della fine del XVIII secolo e la maggior parte degli altri campi della fisica cessarono di essere accessibili ad un pubblico non specialistico nel XIX. Durante quegli stessi due secoli in diversi settori delle scienze biologiche possono essere individuate modificazioni analoghe. In alcuni settori delle scienze sociali può darsi che tale passaggio si stia verificando oggi. Sebbene sia diventato abituale deplorare, e certamente è opportuno deplorarlo, l'approfondimento dell'abisso che separa lo scienziato specialista dai suoi colleghi degli altri campi, si è fatta troppo scarsa attenzione al rapporto essenziale che intercorre tra quell'abisso ed i meccanismi intrinseci al progresso scientifico.

Dall'antichità preistorica in poi, tutti i campi di studio, uno dopo l'altro hanno attraversato la linea di separazione che divide ciò che lo storico potrebbe chiamare la preistoria del campo, considerato come scienza, e la sua storia propriamente detta. Queste transizioni ad uno stadio di maturità sono state raramente così improvvise ed inequivocabili come la mia discussione, necessariamente schematica, potrebbe far pensare. Ma non sono state neppure storicamente graduali, ossia coestensive con lo sviluppo globale dei campi rispettivi nei quali hanno avuto luogo. Gli studiosi che si sono occupati di elettricità durante le prime quattro decadi del XVIII secolo possedevano una informazione circa i fenomeni elettrici molto più vasta di quella che avevano i loro predecessori del XVI secolo. Durante il mezzo secolo successivo al 1740, pochi fenomeni elettrici nuovi furono aggiunti

alla loro lista. Nondimeno, sotto diversi e importanti punti di vista, gli scritti di argomento elettrico di Cavendish, Coulomb e Volta dell'ultimo terzo del XVIII secolo sembrano molto più lontani da quelli di Gray, di Du Fay e persino di Franklin di quanto lo fossero gli scritti di questi inventori dell'inizio del XVIII secolo da quelli del XVI {16}. Ad un certo momento tra il 1740 ed il 1780, i teorici dell'elettricità furono per la prima volta in grado di accettare come veri i fondamenti del loro campo. Da quel momento essi avanzarono verso problemi più concreti e reconditi e da allora in poi comunicarono i loro risultati, in misura sempre crescente, con articoli indirizzati ad altri studiosi della elettricità piuttosto che in libri rivolti al pubblico colto non specializzato. Come gruppo, essi realizzarono una conquista che era stata raggiunta dagli astronomi nell'antichità e dagli studiosi del moto nel Medioevo, dell'ottica fisica alla fine del XVII secolo e della geologia storica all'inizio del XIX secolo. Essi cioè avevano raggiunto un paradigma che si dimostrò capace di guidare la ricerca dell'intero gruppo. Fatta eccezione per il vantaggio di considerare le cose da un punto di vista posteriore nel tempo, è difficile trovare un altro criterio che con altrettanta chiarezza dichiari scienza un campo scientifico.

Capitolo terzo.

La natura della scienza normale

Quale è allora la natura di quel genere di ricerca più specializzata ed esoterica che è resa possibile dalla accettazione di un unico paradigma da parte di un gruppo? Se il paradigma rappresenta un lavoro che è stato realizzato una volta per tutte, quali ulteriori problemi vengono lasciati aperti da esso, perché il gruppo così unificato li risolva? Queste domande appariranno ancor più urgenti, se rivolgiamo ora l'attenzione su un particolare rispetto sotto il quale i termini fin qui usati possono risultare fuorvianti. Nell'uso corrente, per paradigma si intende un modello o uno schema accettato, e questo aspetto del suo significato mi ha permesso qui, in mancanza di uno migliore, di appropriarmi del termine di 'paradigma'. Ma ben presto apparirà chiaramente che il significato di 'modello' e di 'schema' che permette tale appropriazione non è propriamente quello abituale nella definizione di 'paradigma'. In grammatica, ad esempio, «amo, amas, amat» è un paradigma, perché mostra lo schema da usare nel coniugare numerosi altri verbi latini, ad esempio nell'ottenere «laudo, laudas, laudat». In questa applicazione convenzionale, la funzione del paradigma è quella di permettere la riproduzione di esempi, ciascuno dei quali potrebbe servire in linea di principio a sostituirlo. In una scienza, però, un paradigma è raramente uno strumento di riproduzione. Invece, analogamente ad un verdetto giuridico accettato nel diritto comune, è lo strumento per una ulteriore articolazione e determinazione sotto nuove o più restrittive condizioni.

Per vedere come ciò funziona, dobbiamo riconoscere quanto limitato possa essere sia l'ambito che la precisione di un paradigma, allorché esso appare in scena per la prima volta. I

paradigmi raggiungono la loro posizione perché riescono meglio dei loro competitori a risolvere alcuni problemi che il gruppo degli specialisti ha riconosciuto come urgenti. Riuscire meglio, però, non significa riuscire completamente per quanto riguarda un unico problema o riuscire abbastanza bene per moltissimi problemi. Il successo di un paradigma — sia esso l'analisi aristotelica del movimento, o il calcolo tolemaico della posizione dei pianeti, o l'uso della bilancia fatto da Lavoisier, o la matematizzazione che Maxwell compì del campo elettromagnetico — è all'inizio, in gran parte, una promessa di successo che si può intravedere in alcuni esempi scelti ed ancora incompleti. La scienza normale consiste nella realizzazione di quella promessa, una realizzazione ottenuta e — stendendo la conoscenza di quei fatti che il paradigma indica come particolarmente rivelatori, accrescendo la misura in cui questi fatti si accordano con le previsioni del paradigma, e articolando ulteriormente il paradigma stesso.

Pochi tra coloro che non siano effettivamente impegnati nell'attività di una scienza matura si rendono conto di quanto lavoro di ripulitura di tal genere resti da fare dopo l'accettazione di un paradigma, o di quanto affascinante possa essere l'esecuzione di un simile lavoro. E questi punti devono essere chiaramente capiti. Le operazioni di ripulitura costituiscono l'attività che impegna la maggior parte degli scienziati nel corso di tutta la loro carriera. Esse costituiscono quella che qui chiamo la scienza normale. Una attività di tal genere, se esaminata da vicino, sia come è stata fatta nel corso della storia, sia come è condotta nei laboratori contemporanei, si presenta come un tentativo di forzare la natura entro le caselle prefabbricate e relativamente rigide fomite dal paradigma. Il compito della scienza normale non è affatto quello di scoprire nuovi generi di fenomeni; anzi, spesso sfuggono completamente quelli che non si potrebbero adattare all'incasellamento. Gli scienziati non mirano neanche, di norma, ad inventare nuove teorie, e anzi si mostrano spesso intolleranti verso quelle inventate da altri {17}. La ricerca nell'ambito della scienza normale è invece rivolta all'articolazione di quei fenomeni e di quelle teorie che sono già fornite dal paradigma.

Questi sono forse difetti. L'area di ricerca in cui opera la scienza normale è, naturalmente, molto ristretta; l'impresa che ora stiamo discutendo ha una visuale drasticamente limitata. Ma

quelle restrizioni, prodotte dalla fiducia in un paradigma, si rivelano essenziali allo sviluppo della scienza. Concentrando l'attenzione su un ambito ristretto di problemi relativamente esoterici, il paradigma costringe gli scienziati a studiare una parte della natura in modo così particolareggiato e approfondito che sarebbe altrimenti inimmaginabile. D'altra parte, la scienza normale possiede un meccanismo interno che assicura il rilassamento delle restrizioni che vincolano la ricerca ogniqualvolta il paradigma da cui quelle derivano cessa di funzionare efficacemente. In quel momento gli scienziati cominciano ad assumere un differente comportamento, e cambia la natura dei problemi della loro ricerca. Nel frattempo, però, durante il periodo in cui il paradigma ha successo, la comunità degli specialisti avrà risolto problemi che i suoi membri avrebbero difficilmente potuto immaginare e non avrebbero mai affrontato se non si fossero appoggiati al paradigma. E sempre, almeno una parte dei risultati ottenuti si dimostrano permanenti.

Per chiarire meglio che cosa si intende qui per ricerca normale o basata su paradigmi, tenterò ora di classificare ed illustrare i problemi da cui principalmente è costituita la scienza normale. Per comodità, rinvio a più tardi l'esame dell'attività teoretica e comincio con la raccolta dei fatti, cioè con gli esperimenti e le osservazioni descritte nei giornali tecnici attraverso i quali gli scienziati informano i loro colleghi della stessa specializzazione circa i risultati della loro continua ricerca. Su quali aspetti della natura gli scienziati presentano di solito le loro relazioni? Che cosa determina la loro scelta? E, dal momento che gran parte dell'osservazione scientifica richiede tempo, equipaggiamento tecnico e soldi in gran quantità, che cosa spinge uno scienziato a condurre quella scelta fino alla sua conclusione?

Vi sono, penso, soltanto tre punti focali normali nella ricerca scientifica dei fatti, ed essi non sono né sempre, né permanentemente distinti. Innanzitutto v'è quella classe di fatti che il paradigma ha indicato come particolarmente rivelatori della natura delle cose. Usandoli nella soluzione dei problemi, il paradigma li ha resi degni di essere determinati con maggiore precisione ed in una più vasta varietà di situazioni. In differenti momenti di tempo queste determinazioni di fatti significativi hanno compreso: in astronomia, la posizione e la grandezza delle stelle, i periodi delle eclissi delle stelle binarie e dei pianeti; in

fisica, le gravità specifiche e l'elasticità dei materiali, le lunghezze d'onda e le intensità dello spettro, le conduttività elettriche ed i potenziali di contatto; ed in chimica, i pesi di composizione e di combinazione, i punti di ebollizione e il grado di acidità delle soluzioni, le formule di struttura e le attività ottiche. Gli studi fatti allo scopo di accrescere la portata e l'accuratezza con cui fatti come questi sono conosciuti costituiscono una porzione significativa della letteratura della scienza sperimentale e di osservazione. A questo scopo, continuamente, sono stati progettati complicati apparati specializzati, e l'invenzione, la costruzione, e l'impiego di simili apparati ha richiesto talenti di prim'ordine, molto tempo, e considerevole sostegno finanziario. Sincrotroni e radiotelescopi sono soltanto gli esempi più recenti che mostrano quanto lontano si spingeranno i ricercatori se un paradigma li riassicura che i fatti che essi cercano sono importanti. Da Tycho Brahe a E. O. Lawrence, alcuni scienziati si sono conquistata una notevole riputazione non per la novità delle loro scoperte, ma per la precisione, l'attendibilità e la portata dei metodi che essi hanno sviluppato per la rideterminazione di un genere di fatti già precedentemente noto.

Una seconda abituale, ma più piccola, classe di determinazioni fattuali riguarda quei fatti che, pur non avendo per se stessi un grosso interesse, possono venire direttamente messi a confronto con le previsioni ricavate dalla teoria paradigmatica. Come vedremo fra poco quando dai problemi sperimentali passerò a quelli teorici della scienza normale, è raro trovare molti settori in cui una teoria scientifica, particolarmente se essa è formulata in una forma prevalentemente matematica, possa venire messa direttamente a confronto con la natura. Non più di tre settori di questo genere si sono finora dimostrati accessibili alla teoria generale della relatività di Einstein {18}. Inoltre, anche in quei settori ove l'applicazione è possibile, essa richiede spesso approssimazioni teoriche e sperimentali che limitano drasticamente l'accordo che ci se ne aspetta. Il compito di rendere tale accordo più profondo o di trovare nuovi settori in cui possa essere dimostrato un accordo presenta una sfida costante all'abilità e all'immaginazione dello sperimentatore e dell'osservatore. Speciali telescopi per dimostrare la previsione copernicana della parallasse annuale; la macchina di Atwood, inventata per la prima volta quasi un secolo dopo la comparsa dei

Principia, per dare la prima dimostrazione inequivocabile della seconda legge di Newton; l'apparecchiatura di Foucault per mostrare che la velocità della luce è maggiore nell'aria che nell'acqua; o il gigantesco contatore a scintillazione progettato per dimostrare l'esistenza del neutrino: tutte queste apparecchiature specializzate e molte altre simili illustrano l'immenso sforzo e l'ingegnosità che sono stati necessari per dimostrare un accordo sempre più stretto fra la natura e la teoria {19}. Lo sforzo fatto per dimostrare questo accordo costituisce un secondo tipo di lavoro sperimentale proprio della scienza normale, e dipende dal paradigma in maniera ancor più evidente del primo. L'esistenza del paradigma stabilisce il problema da risolvere; spesso la teoria paradigmatica è direttamente implicita nel progetto dell'apparecchiatura capace di risolvere il problema. Senza i *Principia*, ad esempio, le misurazioni compiute con la macchina di Atwood non avrebbero avuto significato alcuno.

Una terza classe di esperimenti e di osservazioni esaurisce, penso, l'attività di raccolta dei fatti nell'ambito della scienza normale. Essa consiste nel lavoro empirico intrapreso per articolare la teoria paradigmatica, risolvendo alcune delle ambiguità che vi sono rimaste e permettendo la soluzione di problemi sui quali essa si era in precedenza limitata a richiamare l'attenzione. Questa classe si dimostra la più importante di tutte, e la sua descrizione richiede una suddivisione. Nelle scienze che hanno un maggiore carattere matematico, alcuni degli esperimenti che hanno per scopo la suddetta articolazione vengono diretti a determinare costanti fisiche. L'opera di Newton, ad esempio, indicava che la forza tra due masse unitarie ad una distanza unitaria doveva essere la stessa per tutti i tipi di materia in tutti i punti dell'universo. Ma tutti i suoi problemi potevano venire risolti senza neppure determinare la misura di questa attrazione, la costante gravitazionale universale; e nessuno escogitò una apparecchiatura capace di determinarla per tutto un secolo dopo la comparsa dei *Principia*. La famosa determinazione di Cavendish verso il 1790 non fu l'ultima. A causa della sua posizione centrale nella teoria fisica, d'allora in poi il perfezionamento della valutazione della costante gravitazionale è sempre stato l'oggetto di sforzi ripetuti da parte di un gran numero di eminenti sperimentatori {20}. Altri esempi dello stesso genere di ricerca ininterrotta dovrebbero includere le determinazioni dell'unità

astronomica, il numero di Avogadro, il coefficiente di Joule, la carica elettronica, e così via. Pochi di questi compiti minuziosi sarebbero stati concepiti e nessuno sarebbe stato eseguito senza una teoria paradigmatica che definisse il problema e garantisse l'esistenza di una soluzione sicura.

Gli sforzi per articolare un paradigma non si limitano, però, alla determinazione di costanti universali. Essi possono avere di mira, ad esempio, anche la formulazione di leggi quantitative: la legge di Boyle che stabilisce una relazione tra la pressione di un gas ed il suo volume, la legge di Coulomb relativa all'attrazione elettrica e la formula di Joule che stabilisce un rapporto tra la corrente e la resistenza elettriche ed il calore da esse generato, rientrano tutte in questa categoria. Forse non è del tutto evidente che un paradigma sia requisito preliminare alla scoperta di leggi come queste. Si sente spesso dire che queste vengono trovate esaminando misurazioni compiute per se stesse, senza richiamarsi ad alcuna teoria. Ma *la* storia non conferma l'esistenza di un metodo così eccessivamente baconiano. Gli esperimenti di Boyle non potevano essere concepiti (e, se concepiti, avrebbero ricevuto una diversa interpretazione o non ne avrebbero ricevuta alcuna) finché non si riconobbe che l'aria era un fluido elastico cui si potevano applicare tutti i concetti elaborati per l'elettrostatica {21}. Il successo di Coulomb dipese dall'aver egli costruito una apparecchiatura speciale per misurare la forza esistente tra cariche puntiformi. (Coloro che avevano in precedenza misurato forze elettriche usando comuni bilance a piatti, ecc., non avevano riscontrato alcuna consistente o semplice regolarità). Ma la sua impostazione, a sua volta, dipendeva dal precedente riconoscimento che ogni particella di fluido elettrico agisce a distanza su ogni altra simile particella. Ed era appunto la forza esistente tra particelle di tal genere — l'unica forza che poteva venire tranquillamente considerata come semplice funzione della distanza — ciò di cui il Coulomb andava in cerca {22}. Anche gli esperimenti di Joule potrebbero venire usati per illustrare come avviene che leggi quantitative emergano attraverso l'articolazione di un paradigma. Di fatto, la relazione tra un paradigma quantitativo ed una legge quantitativa è così stretta e così generale che, da Galileo in poi, leggi di tal genere sono state spesso correttamente congetturate con l'aiuto di un paradigma parecchi anni prima che potesse essere progettata un'apparecchiatura per

la loro determinazione sperimentale {23}.

Invece, v'è un terzo genere di esperimenti che ha lo scopo di articolare un paradigma. In misura ancora maggiore degli altri, questo può assomigliare all'esplorazione, ed è particolarmente frequente in quei periodi ed in quelle scienze che sono interessati allo studio della regolarità della natura più nei suoi aspetti qualitativi che in quelli quantitativi. Spesso un paradigma, stabilito per spiegare un gruppo di fenomeni, diventa ambiguo quando viene applicato ad altri fenomeni strettamente collegati ai primi. Allora gli esperimenti sono necessari per operare una scelta tra i vari modi alternativi di applicare il paradigma alla nuova area di interesse. Ad esempio, le applicazioni del paradigma della teoria del calorico consistevano nelle operazioni di riscaldamento e di raffreddamento mediante mescolanze e mediante cambiamento di stato. Ma il calore poteva essere emesso od assorbito in molte altre maniere — ad esempio, per combinazione chimica, per frizione, e per compressione o assorbimento di un gas — ed a ciascuno di questi altri fenomeni la teoria poteva venire applicata in parecchie maniere. Se il vuoto aveva una capacità termica, ad esempio, il riscaldamento per compressione poteva allora essere spiegato come il risultato derivante dal mescolare un gas col vuoto. Oppure poteva essere dovuto ad un cambiamento del calore specifico dei gas col cambiare della pressione. Ed oltre a queste, v'erano parecchie altre spiegazioni possibili. Furono fatti molti esperimenti per elaborare queste varie possibilità e per distinguerle le une dalle altre; tutti questi esperimenti erano il prodotto della teoria del calorico come paradigma, e tutti facevano uso di esso nella progettazione degli esperimenti e nella interpretazione dei risultati {24}. Una volta stabilito il fenomeno del riscaldamento per compressione, tutti gli altri esperimenti fatti in questo settore dipendevano dal paradigma in questo modo. Dato il fenomeno, come potrebbe essere stato scelto altrimenti un esperimento mirante ad elucidarlo?

Volgiamoci ora ai problemi teorici di una scienza normale, che rientrano più o meno nelle stesse classi di quelli sperimentali e di osservazione. Una parte dell'attività teorica di una scienza normale e, sia pure soltanto una piccola parte, consiste semplicemente nell'usare la teoria esistente per prevedere informazioni su fatti di valore intrinseco. La compilazione delle efemeridi astronomiche, il computo delle caratteristiche delle lenti, e così via, sono esempi di

problemi di questo genere. Gli scienziati, però, lo considerano generalmente un lavoro inferiore, da lasciare ad ingegneri e tecnici. Di questo tipo di lavoro si parla molto poco sui giornali scientifici importanti. Questi giornali contengono invece un gran numero di discussioni teoriche di problemi che, a coloro che non sono scienziati, devono sembrare quasi identici. Queste discussioni sono manipolazioni della teoria compiute non perché le previsioni cui esse danno luogo abbiano un valore intrinseco, ma perché esse possono venire messe a diretto confronto con gli esperimenti. Il loro scopo è quello di presentare una nuova applicazione del paradigma o di accrescere la precisazione di una applicazione che è già stata fatta.

L'esigenza di un'attività di questo genere nasce dalle immense difficoltà che spesso si incontrano nello sviluppare punti di contatto tra una teoria e la natura. Queste difficoltà possono venire illustrate brevemente esaminando la storia della dinamica dopo Newton. All'inizio del XVIII secolo, quegli scienziati che trovarono nei *Principia* un paradigma, accettarono anche la maggior parte delle sue conclusioni, ed avevano tutte le ragioni per fare ciò. Nessun'altra opera nella storia della scienza ha permesso simultaneamente un così grande aumento sia della portata che della precisione della ricerca. Per quanto riguarda i cieli, Newton aveva dedotto le leggi di Keplero dei movimenti planetari ed aveva anche spiegato certe osservazioni secondo cui la luna non vi ubbidiva. Per quanto concerneva la terra, egli aveva dedotto i risultati di alcune osservazioni sparse concernenti i pendoli, i piani inclinati e le maree. Con l'aiuto di ulteriori assunzioni *ad hoc*, egli fu anche in grado di dedurre la legge di Boyle ed una formula importante per la velocità del suono nell'aria. Date le condizioni della scienza del tempo, il successo di queste dimostrazioni era estremamente impressionante. Tuttavia, data la presunta generalità delle leggi di Newton, il numero di queste applicazioni non era grande, e Newton non ne sviluppò quasi nessun'altra. Inoltre, paragonate coi risultati che ogni studente universitario di fisica può raggiungere con quelle stesse leggi oggi, le poche applicazioni di Newton non furono neppure sviluppate con precisione.

Limitiamo per ora la nostra attenzione al problema della precisione. Abbiamo già illustrato il suo aspetto empirico. Per ottenere i dati specifici che le concrete applicazioni del paradigma

di Newton richiedevano si rese necessaria una speciale apparecchiatura, come quella di Cavendish, o la macchina di Atwood, o telescopi perfezionati. Analoghe difficoltà nell'ottenere un accordo esistevano dal punto di vista della teoria. Nella applicazione delle sue leggi al pendolo, ad esempio, Newton fu costretto a considerare il pendente come un punto massa allo scopo di fornire un'unica definizione della lunghezza del pendolo. La maggior parte dei suoi teoremi, tranne poche eccezioni presentate come ipotetiche e preliminari, trascuravano anche l'effetto della resistenza dell'aria. Essi erano buone approssimazioni fisiche. Tuttavia, come approssimazioni, essi limitavano l'area di accordo che ci si poteva aspettare tra le previsioni di Newton e gli esperimenti effettivi. Le stesse difficoltà si presentano con evidenza ancora maggiore nella applicazione della teoria di Newton ai cieli. Semplici osservazioni quantitative fatte col telescopio mostrano che i pianeti non obbediscono strettamente alle leggi di Keplero, e la teoria di Newton giustifica questo fatto. Per dedurre quelle leggi, Newton era stato costretto a trascurare tutte le attrazioni gravitazionali eccetto quelle tra i singoli pianeti ed il sole. Dal momento che i pianeti si attraggono l'un l'altro, ci si poteva aspettare soltanto un accordo approssimativo tra l'applicazione della teoria e l'osservazione fatta col telescopio {25}.

Come nel caso dei pendoli, l'accordo ottenuto era più che soddisfacente per coloro che lo ottennero. Nessun'altra teoria poteva essere altrettanto soddisfacente. Nessuno di coloro che misero in dubbio la validità dell'opera di Newton lo fece a causa dei limiti che esistevano nel modo in cui essa si accordava con gli esperimenti e con le osservazioni. Tuttavia questi limiti lasciarono aperti molti affascinanti problemi teorici ai successori di Newton. Furono necessarie per esempio nuove tecniche teoriche, per determinare la «lunghezza equivalente» di un pendolo di considerevoli dimensioni. Si resero pure necessarie tecniche particolari per trattare dei moti simultanei di più di due corpi in attrazione reciproca.

Questi problemi e molti altri dello stesso genere tennero occupati molti fra i migliori matematici d'Europa nel XVIII e nel XIX secolo. I Bernoulli, Eulero, Lagrange, Laplace, e Gauss realizzarono alcune delle loro conquiste più brillanti nello studio di problemi che miravano a perfezionare l'accordo tra il paradigma di

Newton e la natura. Al tempo stesso, parecchi di loro lavorarono a sviluppare le tecniche matematiche necessarie per applicazioni che Newton non aveva neppure tentato, producendo, ad esempio, una immensa letteratura ed alcuni potenti strumenti matematici per l'idrodinamica e per il problema delle corde vibranti. Questi problemi di applicazione riguardano quello che probabilmente è il più brillante e consumato lavoro scientifico del XVIII secolo. Esaminando il periodo post-paradigmatico, potrebbero essere trovati altri esempi nello sviluppo della termodinamica, della teoria ondulatoria della luce, della teoria elettromagnetica, o di qualsiasi altra branca scientifica le cui leggi fondamentali siano completamente quantitative. Almeno nelle scienze aventi un maggiore carattere matematico, la maggior parte dell'attività teorica è di questo genere.

Ma non è tutta di questo genere. Persino nelle scienze matematiche vi sono problemi teorici concernenti l'articolazione di paradigmi; ed in periodi in cui lo sviluppo scientifico è prevalentemente qualitativo, questi problemi sono dominanti. Sia nelle scienze a carattere maggiormente quantitativo come in quelle prevalentemente qualitative, alcuni problemi mirano semplicemente ad una chiarificazione mediante una riformulazione. I *Principia* ad esempio non sempre si dimostrano un'opera di facile applicazione, in parte perché essi conservavano un po' della incertezza ed indecisione che è inevitabile all'inizio di ogni impresa avventurosa, in parte perché gran parte del suo significato era soltanto implicito nelle sue applicazioni. Perdo, dai Bernoulli, d'Alambert e Lagrange nel XVIII secolo fino a Hamilton, a Jacobi e a Hertz nel XIX secolo, molti fra i più brillanti fisici matematici europei fecero ripetuti tentativi per riformulare la teoria di Newton in una forma equivalente, ma logicamente ed esteticamente più soddisfacente. Essi desideravano cioè render note le lezioni esplicite ed implicite dei *Principia* in una versione logicamente più coerente, tale che fosse meno equivoca nelle sue applicazioni ai problemi di meccanica recentemente elaborati {26}.

Analoghe riformulazioni dei paradigmi hanno avuto luogo ripetutamente in tutte le scienze, ma la maggior parte di esse hanno prodotto nel paradigma mutamenti più sostanziali di quelli introdotti dalle riformulazioni dei *Principia* cui abbiamo sopra accennato. Tali mutamenti sono il risultato dell'attività empirica precedentemente descritta come mirante ad articolare il

paradigma. Infatti, è stato arbitrario classificare come empirico quel tipo di attività. I problemi concernenti l'articolazione del paradigma sono al tempo stesso teorici e sperimentali più di quanto lo sia ogni altro genere di ricerca normale: gli esempi forniti precedentemente vanno altrettanto bene qui. Coulomb, prima di poter costruire la sua apparecchiatura e fare misurazioni con essa, dovette ricorrere alla teoria elettrica per determinare come doveva essere costruita la sua apparecchiatura. La conseguenza delle sue misurazioni fu un raffinamento della teoria stessa. E ancora, coloro che progettarono gli esperimenti che avevano lo scopo di operare una distinzione fra le varie teorie del riscaldamento per compressione erano generalmente gli stessi che avevano preparato le versioni da confrontare. Essi operavano sia coi fatti che con la teoria, e la loro opera non produsse semplicemente nuove informazioni, ma anche un paradigma più preciso, ottenuto eliminando le ambiguità che rimanevano nel paradigma originario dal quale essi erano partiti. In molte scienze, la maggior parte dell'attività normale è di questo genere.

Queste tre classi di problemi — la determinazione di fatti rilevanti, il confronto dei fatti con la teoria, e l'articolazione della teoria — esauriscono, penso, la letteratura della scienza normale, sia empirica che teorica. Esse però non esauriscono, naturalmente, l'intera letteratura della scienza. Vi sono anche problemi straordinari, e può darsi che sia la loro soluzione a rendere l'impresa scientifica nel suo complesso così particolarmente degna d'essere affrontata. Ma i problemi straordinari non si trovano quando si cercano. Essi emergono soltanto in speciali circostanze prodotte dal progresso della ricerca normale. Inevitabilmente, perciò, la stragrande maggioranza dei problemi di cui persino i migliori scienziati si occupano rientra di solito in una delle tre categorie delineate sopra. Non v'è altro modo di fare ricerca scientifica all'insegna di un paradigma, e abbandonare il paradigma significa cessare di praticare la scienza che esso definisce. Scopriremo fra poco che di tanto in tanto succede che diserzioni di questo genere avvengano: esse sono i cardini attorno a cui ruotano le rivoluzioni scientifiche. Ma prima di cominciare lo studio di tali rivoluzioni, abbiamo bisogno di una visione più panoramica delle ricerche all'interno della scienza normale, che preparano la via.

Capitolo quarto.

La scienza normale come soluzione di rompicapo

Forse la caratteristica più notevole dei problemi della scienza normale che abbiamo appena incontrati è la scarsa misura in cui essi mirano a produrre novità fondamentali, sia concettuali che fattuali. Talvolta, come per la misurazione delle lunghezze d'onda, il risultato è conosciuto in anticipo in ogni suo dettaglio, eccetto in quelli più esoterici, e ciò che ci si aspetta è solo di poco più vasto. Le misurazioni di Coulomb non avevano forse bisogno di adattarsi perfettamente ad una legge dell'inverso del quadrato; coloro che facevano ricerche sul problema del riscaldamento per compressione erano preparati ad ottenere uno qualsiasi di parecchi risultati possibili. Tuttavia, anche in casi come questi, l'arco di risultati anticipati, e quindi assimilabili, è sempre piccolo in relazione all'arco delle possibilità che l'immaginazione può concepire. E il progetto il cui risultato non rientra entro quest'arco più ristretto rappresenta di solito semplicemente un fallimento della ricerca, fallimento che si riflette non sulla natura ma sullo scienziato.

Nel XVIII secolo, ad esempio, veniva dedicata scarsa attenzione agli esperimenti che misuravano l'attrazione elettrica per mezzo di dispositivi quali la bilancia a piatti. Poiché i loro risultati non erano né coerenti né semplici, essi non potevano venire usati per articolare il paradigma dal quale derivavano. Perdo essi restavano *meri* fatti, senza alcun rapporto, ed incapaci di averne, col continuo progresso della ricerca elettrica. Soltanto retrospettivamente, basandosi su di un paradigma successivo, oggi possiamo vedere quali caratteristiche dei fenomeni elettrici esse pongono in rilievo. Anche Coulomb ed i suoi contemporanei,

naturalmente, possedevano questo paradigma oppure un qualche altro paradigma che, quando veniva applicato al problema dell'attrazione, dava luogo alle medesime aspettative. È per questo che Coulomb fu in grado di progettare una apparecchiatura che fornì risultati assimilabili mediante una articolazione del paradigma. Ma è anche la ragione per la quale quel risultato non sorprese nessuno e per la quale parecchi contemporanei di Coulomb erano stati capaci di prevederlo in anticipo. Anche il progetto che ha come scopo l'articolazione del paradigma non mira a novità *inattese*.

Ma se lo scopo della scienza normale non sta in fondamentali e sostanziali novità, se l'incapacità di ottenere od andare vicini al risultato anticipato è di solito un fallimento per lo scienziato, perché questi problemi vengono affrontati? Parte della risposta è già stata sviluppata in precedenza. Per gli scienziati, almeno, i risultati ottenuti nel corso della ricerca «normale» sono significativi perché accrescono la portata e la precisione con cui il paradigma può essere applicato. Una simile risposta però non può spiegare l'entusiasmo e la devozione che gli scienziati dimostrano per i problemi della ricerca normale. Nessuno dedica anni per perfezionare uno spettrometro o per trovare una soluzione migliore del problema delle corde vibranti semplicemente per l'importanza delle informazioni che se ne otterrà. I dati che si ottengono calcolando efemeridi o facendo ulteriori misurazioni con uno strumento esistente sono spesso altrettanto significativi, ma questo genere di attività è regolarmente guardata con disprezzo dagli scienziati, perché si tratta in larga misura di ripetizioni di procedimenti che sono già stati eseguiti in precedenza. Tale rifiuto fornisce una chiave per intendere il fascino dei problemi della ricerca normale. Sebbene il suo risultato finale possa essere anticipato, spesso in modo tanto particolareggiato che ciò che resta da conoscere è in se stesso privo di interesse, la via da seguire per ottenere quel risultato rimane ancora sconosciuta. Portare un problema della ricerca normale alla sua conclusione equivale ad ottenere ciò che si è anticipato in un modo nuovo, e ciò richiede la soluzione di tutta una serie di complessi rompicapi strumentali, concettuali e matematici. Colui che riesce nell'impresa si dimostra un esperto solutore di rompicapi, e la sfida del rompicapo è una parte importante delle ragioni che di solito lo spingono avanti.

I termini 'rompicapo' e 'solutore di rompicapo' mettono in luce parecchi dei temi che hanno acquistato una importanza sempre maggiore nelle pagine precedenti. I rompicapo sono, nel significato assolutamente usuale qui usato, quella speciale categoria di problemi che possono servire a mettere a prova la ingegnosità o la abilità nel risolverli. Il dizionario dà come esempi di rompicapo il gioco consistente nel mettere insieme pezzetti irregolari per comporre un disegno e il gioco delle parole crociate: dobbiamo ora cercare di isolare le caratteristiche che questi giochi hanno in comune coi problemi della scienza normale. Una caratteristica è stata già ricordata. Non è un criterio per giudicare di un rompicapo il fatto che il risultato sia intrinsecamente interessante o importante. Al contrario, i problemi veramente pressanti, come la cura del cancro o il progetto di una pace duratura, spesso non sono affatto rompicapo, soprattutto perché può darsi che non abbiano alcuna soluzione. Si consideri il gioco di ricomporre un disegno con pezzetti irregolari, nel caso in cui questi pezzetti siano stati presi a caso da due scatole preparate per disegni diversi. Poiché è probabile che un simile problema metta alla prova (sebbene non necessariamente) anche il più ingegnoso degli uomini, esso non può servire come un metodo per verificare l'abilità nel risolvere i rompicapo. Nel senso abituale del termine, non è affatto un rompicapo. Mentre il valore intrinseco non è un criterio per definire un rompicapo, lo è invece la certezza che esista una soluzione.

Abbiamo già visto, però, che una delle cose che una comunità scientifica acquista con un paradigma è un criterio per scegliere i problemi che, nel tempo in cui si accetta il paradigma, sono ritenuti solubili. In larga misura, questi sono gli unici problemi che la comunità ammetterà come scientifici e che i suoi membri saranno incoraggiati ad affrontare. Altri problemi, compresi alcuni che erano stati usuali in periodi anteriori, vengono respinti come metafisici, come appartenenti ad un'altra disciplina, o talvolta semplicemente come troppo problematici per meritare che si sciupi del tempo attorno ad essi. Un paradigma può finire addirittura, per questa via, con l'isolare la comunità da quei problemi socialmente importanti che non sono riducibili alla forma di rompicapo, poiché essi non possono venire formulati nei termini degli strumenti tecnici e concettuali forniti dal paradigma. Problemi come questi possono essere una distrazione, lezione

questa brillantemente illustrata da diversi aspetti del baconianismo del XVII secolo e da alcune scienze sociali contemporanee. Una delle ragioni per cui la scienza normale sembra fare progressi così rapidi è che coloro che svolgono attività di ricerca entro i suoi quadri concentrano il loro lavoro su problemi che soltanto la loro mancanza di ingegnosità potrebbe impedir loro di risolvere.

Ma se i problemi della scienza normale sono rompicapo in questo senso, non abbiamo più bisogno di chiederci perché gli scienziati li affrontino con tanta passione e devozione. Un uomo può venire attratto verso la scienza per tante ragioni diverse. Tra queste v'è il desiderio di essere utile, l'eccitazione di esplorare nuovi territori, la speranza di trovare un qualche ordine e la spinta a mettere alla prova conoscenze stabilite. Questi ed altri motivi lo aiutano anche a determinare i problemi particolari che lo impegneranno più tardi. Inoltre, sebbene il risultato sia talvolta deludente, vi sono buone ragioni perché motivi come questi debbano innanzitutto attrarlo e poi guidarlo {27}. La ricerca scientifica nel suo complesso di tanto in tanto si dimostra utile, apre nuovi territori, fa ordine e verifica la validità di teorie per molto tempo accettate. Nondimeno, *l'individuo* impegnato in un problema della ricerca normale *non fa quasi mai di queste cose*. Una volta che si è impegnato nell'impresa, le sue motivazioni sono di tipo completamente diverso. Ciò che allora lo guida è il convincimento che, solo che sia abbastanza abile, riuscirà a risolvere un rompicapo che nessuno prima di lui ha saputo risolvere o ha risolto così bene. Molte fra le più grandi menti scientifiche hanno dedicato tutta la loro attenzione professionale a rompicapi impegnativi di tal genere. Nella maggior parte dei casi, in nessun ambito particolare di ricerca specializzata si trova qualcosa di diverso da fare: ma ciò non rende la ricerca meno affascinante ai suoi addetti.

Volgiamoci ora ad un altro aspetto, più difficile e più rivelatore, del parallelismo tra i rompicapo e i problemi della scienza normale. Per essere classificato un rompicapo, un problema deve essere caratterizzato da qualcosa di più di una soluzione certa. Vi devono essere anche regole che delimitano la natura delle soluzioni accettabili come anche i passaggi attraverso i quali si devono ottenere tali soluzioni. Risolvere un rompicapo consistente nel ricomporre pezzetti irregolari di un disegno non significa

semplicemente «fare un quadro». Un bambino o un artista contemporaneo potrebbe fare ciò spargendo su un campo neutro alcuni pezzi scelti considerati come forme astratte. Il quadro così prodotto potrebbe essere di gran lunga migliore, e sarebbe certamente più originale, di quello da cui è stato fatto il gioco. Nondimeno, un tale quadro non rappresenterebbe una soluzione. Per ottenere questa si devono usare tutti i pezzi e si debbono unire gli uni accanto agli altri, cercando di farli combaciare finché non rimane più nessuno spazio vuoto. Queste sono le regole che governano il gioco. Analoghe restrizioni si possono facilmente indicare per quanto riguarda le soluzioni ammissibili di parole crociate, indovinelli, problemi di scacchi, e così via.

Se possiamo accettare un uso considerevolmente allargato del termine 'regola' — un uso che in certi casi lo equipari a 'punto di vita stabilito' od a 'preconcetto' —, allora i problemi accessibili all'interno di una data tradizione scientifica presentano caratteristiche molto simili a quelle dei rompicapo. Colui che costruisce uno strumento per determinare le lunghezze d'onda o della luce non deve accontentarsi di una apparecchiatura che si limita ad attribuire particolari numeri a particolari linee spettrali. Egli non è semplicemente un esploratore o un misuratore. Al contrario, deve mostrare, analizzando la sua apparecchiatura nei termini del complesso stabilito di dottrine della teoria ottica, che i numeri prodotti dal suo apparato sono quelli che nella teoria corrispondono alle lunghezze d'onda. Se qualche indeterminatezza della teoria o qualche elemento non analizzato dell'apparecchiatura gli impedisce di condurre a termine quella dimostrazione, i suoi colleghi possono benissimo trarne la conclusione che egli non ha misurato assolutamente nulla. Ad esempio, i massimi di dispersione degli elettroni, che furono più tardi diagnosticati come indici della lunghezza d'onda degli elettroni, non possedevano nessun apparente significato quando furono osservati e registrati per la prima volta. Perché potessero diventare misurazioni di qualcosa, dovettero prima essere messi in relazione con una teoria che prevedeva il comportamento ondulatorio della materia in movimento. Ed anche dopo che questa relazione venne messa in rilievo, l'apparecchiatura per determinarli dovette essere progettata di nuovo, in modo che i risultati sperimentali potessero essere inequivocabilmente messi in rapporto con la teoria {28}. Nessun problema venne risolto

finché queste condizioni non furono soddisfatte.

Restrizioni di genere analogo vincolano le soluzioni ammissibili di problemi teorici. Per tutto il XVIII secolo, quegli scienziati che cercarono di derivare il movimento osservabile della luna dalle leggi newtoniane del moto e della gravitazione fallirono nella loro impresa. Di conseguenza alcuni di essi suggerirono di sostituire la legge dell'inverso del quadrato con una legge che se ne discostasse per piccole distanze. Fare ciò, però, avrebbe significato cambiare il paradigma, definire un nuovo rompicapo, e lasciare irrisolto quello vecchio. Nel caso specifico, gli scienziati conservarono le regole finché, nel 1750, uno di loro scoprì in che modo potevano essere applicate con successo {29}. Soltanto un cambiamento nelle regole del gioco avrebbe potuto offrire un'alternativa.

Lo studio delle tradizioni della scienza normale mette in luce molte altre regole, e queste forniscono una gran quantità di informazioni circa gli impegni che gli scienziati derivano dai loro paradigmi. Quali sono le principali categorie nelle quali possiamo raggruppare queste regole? {30}. La più evidente e forse la più vincolante è quella esemplificata dal tipo di generalizzazioni che abbiamo appena notate. Queste sono esplicite asserzioni di leggi, concetti e teorie scientifiche. Finché continuano ad essere rispettate, tali asserzioni aiutano a formulare i rompicapo ed a limitare le soluzioni accettabili. Le leggi di Newton, ad esempio, assolsero funzioni di questo genere durante il XVIII e il XIX secolo. Fin tanto che esse fecero ciò, il concetto di quantità di materia fu una categoria ontologica fondamentale per i fisici, e le forze che agiscono tra particelle di materia costituiscono l'oggetto principale della ricerca {31}. In chimica, le leggi delle proporzioni definite e costanti ebbero per lungo tempo, una funzione analoga nel formulare il problema dei pesi atomici, nel limitare i risultati ammissibili delle analisi chimiche e nell'informare i chimici circa la natura degli atomi e delle molecole, dei composti e delle mescolanze {32}. Le equazioni di Maxwell e le leggi della termodinamica statistica hanno oggi la stessa influenza e la stessa funzione.

Le regole di questo tipo non sono però né le uniche né le più interessanti messe in evidenza dallo studio storico. Ad un livello più basso e più concreto di quello delle leggi e delle teorie v'è, ad esempio, una moltitudine di assunti che inducono a preferire certi

tipi di strumentazione e a impiegarli secondo le modalità che sono considerate legittime. Il cambiamento degli atteggiamenti riguardo alla funzione del fuoco nelle analisi chimiche ebbe un ruolo vitale nello sviluppo della chimica del XVII secolo {33}. Helmholtz, nel XIX secolo, incontrò una forte resistenza da parte dei fisiologi all'idea che gli esperimenti fisici potessero gettar luce sul loro campo {34}. Ed in questo secolo la singolare storia della cromatografia chimica fornisce un ulteriore esempio che illustra la persistenza di assunti strumentali i quali, non meno delle leggi e delle teorie, forniscono allo scienziato le regole del gioco {35}. Se analizziamo la scoperta dei raggi X, troveremo le ragioni dell'esistenza di tali assunti.

Altre caratteristiche della scienza, meno settoriali e temporanee, sebbene anch'esse non immutabili, sono rappresentate dagli assunti di un livello superiore, quasi metafisico, che lo studio storico ci mostra con tanta regolarità. Dal 1630 circa in poi, ad esempio, e particolarmente dopo la comparsa degli scritti scientifici di Descartes che ebbero una enorme influenza, la maggior parte dei fisici assunsero che l'universo fosse composto di microscopici corpuscoli e che tutti i fenomeni naturali potessero essere spiegati in termini di forma, dimensione, moto, e interazione di corpuscoli. Nel loro insieme, questi assunti erano al tempo stesso metafisici e metodologici; metafisici, in quanto dicevano allo scienziato quali specie di entità conteneva l'universo e quali non conteneva: v'era soltanto materia dotata di forma ed in movimento; metodologici, in quanto determinavano le caratteristiche che dovevano avere le leggi ultime e le spiegazioni fondamentali: le leggi dovevano specificare il movimento e la interazione dei corpuscoli, e le spiegazioni dovevano ridurre ogni dato fenomeno naturale ad una azione corpuscolare governata da quelle leggi. Cosa ancora più importante, la concezione corpuscolare dell'universo indicava allo scienziato l'impostazione che doveva dare a molti dei problemi della sua ricerca. Ad esempio, un chimico che, come Boyle, abbracciava la nuova filosofia, prestava particolare attenzione alle reazioni che potevano essere considerate come trasmutazioni. Queste ultime infatti mostravano, più chiaramente di ogni altra specie di reazioni, il processo di riordinamento di corpuscoli che doveva essere alla base di ogni mutamento chimico {36}. Analoghi effetti di corpuscolarismo si possono osservare nello studio della

meccanica, dell'ottica e del calore.

Infine, ad un livello ancor più elevato, v'è un altro insieme di assunti che devono essere accettati da ogni scienziato, perché possa essere considerato tale. Lo scienziato, ad esempio, deve sentirsi impegnato a comprendere il mondo e ad estendere la portata e la precisione dell'ordine che gli è stato dato. Quest'impegno lo deve, a sua volta, guidare a scrutare, da solo o con l'aiuto dei colleghi, alcuni aspetti della natura fin nei minimi dettagli empirici. E se tale esame svela sacche di apparente disordine, queste lo devono allora stimolare a raffinare ulteriormente le sue tecniche di osservazione o a dare maggiore articolazione alle sue teorie. Senza dubbio vi sono ancora altre regole di questo genere, regole che si sono mantenute valide per gli scienziati di tutti i tempi.

L'esistenza di questa solida struttura di assunti — concettuali, teorici, strumentali, e metodologici — è una delle principali giustificazioni della metafora che paragona la scienza normale alla soluzione di rompicapo. Poiché essa fornisce le regole che gli dicono che cosa sono il mondo e la sua scienza, colui che svolge attività di ricerca in un campo specializzato maturo può concentrare con sicurezza la propria attenzione sui problemi esoterici che queste regole e il livello di conoscenza raggiunto stabiliscono per lui. Ciò che allora costituisce per lui una sfida personale è come risolvere i rompicapo rimasti insoluti. Sotto questo e sotto altri aspetti, una discussione di rompicapo e di regole illumina la natura della pratica di una scienza normale. Però, per un altro aspetto, tale illuminazione può essere notevolmente fuorviante. Sebbene ovviamente vi siano regole cui tutti gli specialisti di una data scienza aderiscono ad un dato momento, quelle regole possono anche non essere di per se stesse capaci di specificare tutto ciò che l'attività di quegli specialisti ha in comune. La scienza normale è un'attività altamente determinata, ma essa non ha bisogno di essere interamente determinata da regole. Questa è la ragione per cui, all'inizio di questo saggio, ho introdotto il concetto di paradigmi in comune piuttosto che quello di regole, assunti o punti di vista in comune, ed ho indicato in quelli la ragione della coerenza delle tradizioni della ricerca normale. Le regole, suggerisco, derivano dai paradigmi, ma i paradigmi possono guidare la ricerca anche in assenza di regole.

Capitolo quinto.

La priorità dei paradigmi

Per scoprire la relazione esistente tra le regole, i paradigmi e la scienza normale, si consideri innanzitutto come lo storico individua i particolari insiemi di impegni che sono appena stati descritti come regole accettate. Una ricerca storica approfondita di una data scienza specializzata in un dato momento rivela la presenza di una serie di illustrazioni ricorrenti e quasi convenzionali di varie teorie nelle loro applicazioni concettuali, osservazionali e strumentali. Queste applicazioni costituiscono i paradigmi della comunità, presenti nei manuali, nelle lezioni universitarie, e negli esercizi di laboratorio. Con lo studio e la pratica di essi, i membri della corrispondente comunità imparano il loro mestiere. Lo storico, naturalmente, scoprirà oltre a questa un'area in penombra, occupata dai risultati la cui accettabilità è ancora in dubbio; ma il nocciolo dei problemi risolti e delle tecniche sarà di regola abbastanza chiaro. A parte e nonostante ambiguità occasionali, i paradigmi di una comunità scientifica matura possono venire determinati con relativa facilità.

La determinazione dei paradigmi in comune non equivale, però, alla determinazione delle regole in comune. Quest'ultima richiede che si faccia un secondo passo di tipo un po' differente. Per far ciò, lo storico deve confrontare i paradigmi della comunità, tra di loro e con il modo in cui vengono presentati i risultati della ricerca. Il suo scopo è di scoprire quali elementi isolabili, espliciti o impliciti, i membri di quella comunità possono avere *astratto* dai loro paradigmi più globali per usarli come regole della loro ricerca. Chiunque abbia tentato di descrivere o analizzare lo sviluppo di una particolare tradizione scientifica sarà necessariamente andato alla ricerca di questo tipo di principi e di

regole accettate. Quasi certamente, come il capitolo precedente ha mostrato, avrà incontrato un successo almeno parziale. Ma se la sua esperienza sarà stata del tutto eguale alla mia, egli avrà trovato che la ricerca di regole è più difficile e dà minori soddisfazioni della ricerca di paradigmi. Alcune delle generalizzazioni di cui egli fa uso per descrivere le opinioni condivise dalla comunità non presenteranno problemi. Altre, però, comprese alcune di quelle usate come illustrazioni nelle pagine precedenti, sembreranno troppo forti. Formulate in quel modo o in ogni altro modo che possa immaginare, sarebbero state quasi certamente respinte da alcuni membri del gruppo che è oggetto di studio. Tuttavia, se la coerenza della tradizione di ricerca deve essere intesa in termini di regole, si rende necessaria qualche specificazione del terreno comune del campo scientifico relativo. Ne consegue che la ricerca di un corpo di regole capaci di costituire una data tradizione di ricerca normale diventa fonte di continua e profonda frustrazione.

Il riconoscimento di tale frustrazione permette, però di diagnosticarne la causa. Gli scienziati possono essere d'accordo che un Newton, un Lavoisier, un Maxwell o uno Einstein hanno presentato una soluzione, a quanto pare, permanente per un gruppo di problemi di notevole rilievo, e tuttavia essere al tempo stesso in disaccordo, talvolta senza neppure esserne coscienti, sulle particolari caratteristiche astratte che rendono permanenti quelle soluzioni. Essi possono, cioè, essere d'accordo nella *identificazione* di un paradigma, senza essere d'accordo sulla sua *interpretazione* o *razionalizzazione* completa e senza neppure tentarne una. La mancanza di una interpretazione comune o di una riduzione a regole su cui si sia d'accordo non impedisce ad un paradigma di guidare la ricerca. La scienza normale può essere in parte determinata dalla diretta ispezione dei paradigmi, processo questo che è spesso aiutato, ma non dipende, dalla formulazione di regole e di assunzioni. Infatti, l'esistenza di un paradigma non implica necessariamente neppure l'esistenza di un qualsiasi insieme completo di regole {37}.

Inevitabilmente, il primo effetto di affermazioni come queste è quello di sollevare problemi. In assenza di un corpo completo di regole, che cosa vincola lo scienziato ad una particolare tradizione di ricerca scientifica normale? Che cosa può significare la frase sull'ispezione diretta dei paradigmi? Sia pure in un contesto totalmente differente, il Ludwig Wittgenstein dell'ultimo periodo

fornì delle risposte parziali a questo tipo di domande. Poiché quel contesto è più elementare e più familiare, risulterà più facile considerare innanzitutto la forma della sua argomentazione. Che cosa dobbiamo sapere — si chiede Wittgenstein — per potere applicare termini come 'sedia', 'foglia', o 'gioco' in maniera inequivocabile e senza provocare discussioni? {38}.

Tale questione è molto antica e generalmente si è risposto dicendo che dobbiamo sapere, coscientemente od intuitivamente, che cosa è una sedia, una foglia, od un gioco. Dobbiamo cioè cogliere un certo insieme di attributi che tutti quei giochi e soltanto essi hanno in comune. Wittgenstein, però, concludeva che, dato il modo in cui usiamo un linguaggio ed il genere di mondo al quale lo applichiamo, non v'è bisogno di un simile insieme di caratteristiche. Sebbene una discussione di *alcuni* fra gli attributi che sono comuni ad un *gran numero* di giochi o di seggiole o di foglie spesso ci aiuta ad imparare come fare uso del termine corrispondente, non v'è alcun insieme di caratteristiche che sia simultaneamente applicabile a tutti i membri della classe e soltanto ad essi. Al contrario, trovandoci di fronte ad una attività che non abbiamo mai osservato in precedenza, applichiamo il termine 'gioco' perché ciò che vediamo presenta una stretta «rassomiglianza di famiglia» con numerose attività che abbiamo precedentemente imparato a chiamare con quel nome. Per Wittgenstein, in breve, giochi, sedie e foglie sono famiglie naturali, ciascuna delle quali è costituita da una rete di rassomiglianze che si incrociano e coincidono tra loro in molti punti. L'esistenza di una tale rete di rassomiglianze è sufficiente a spiegare il nostro successo nell'identificare l'oggetto o l'attività corrispondente. Soltanto se le famiglie che abbiamo nominate coincidessero le une con le altre in diversi punti e gradualmente si fondessero e si identificano le une con le altre — cioè, soltanto se non vi fossero famiglie *naturali* — il nostro successo nell'identificarle e nominarle fornirebbe la prova dell'esistenza di un insieme di caratteristiche comuni corrispondenti a ciascuno dei nomi di classe che noi usiamo.

Qualcosa di analogo può benissimo valere anche per i diversi problemi e le diverse tecniche di ricerca che troviamo all'interno di una particolare tradizione di scienza normale. Ciò che quelli hanno in comune non è il fatto che soddisfino qualche insieme di regole e di assunzioni, esplicite o comunque completamente

scopribili, che forniscano alla tradizione il carattere che le è proprio e l'influenza che essa esercita sulla mentalità scientifica. Al contrario, essi possono avere rapporti di rassomiglianza con, o modellarsi su questa o quella parte del corpo scientifico che la comunità in questione riconosce già come uno dei suoi punti fermi acquisiti. Gli scienziati lavorano sulla base di modelli acquisiti attraverso l'educazione ed attraverso la conseguente assimilazione della letteratura scientifica, spesso senza minimamente conoscere, e senza trovarsi nella necessità di conoscere, quali caratteristiche hanno conferito a questi modelli lo *status* di paradigmi della comunità. E poiché questo è il loro abituale comportamento, essi non hanno bisogno di un insieme completo di regole. La coerenza manifestata dalla tradizione di ricerca di cui essi fanno parte può anche non implicare neppure l'esistenza di un soggiacente corpo di regole ed assunzioni, che l'indagine storica o filosofica può mettere allo scoperto a posteriori. Il fatto che gli scienziati di solito non si chiedono, o non discutono, che cosa renda legittimo un particolare problema o una particolare soluzione ci induce a supporre che, almeno intuitivamente, essi conoscono la risposta. Ma può anche semplicemente indicare che né la domanda né la risposta sono considerate rilevanti per la loro ricerca. I paradigmi possono essere anteriori, più vincolanti e più completi di ogni insieme di regole di ricerca che si possa inequivocabilmente astrarre da essi.

Sin qui, questo punto è stato discusso soltanto in termini teorici: i paradigmi *potrebbero* determinare la scienza normale, senza che si renda necessario l'intervento di regole scopribili. Cercherò ora di accrescere sia la chiarezza sia l'importanza di questa affermazione, sottolineando alcune delle ragioni che ci inducono a credere che i paradigmi di fatto operano in questa maniera. La prima ragione, che è già stata discussa abbastanza ampiamente, è data dalla grande difficoltà di scoprire le regole che hanno guidato le particolari tradizioni della scienza normale. Tale difficoltà è molto simile a quella incontrata dal filosofo quando cerca di dire che cosa hanno in comune tutti i giochi. La seconda ragione, di cui la prima è semplicemente un corollario, affonda le radici nella natura dell'educazione scientifica. Dovrebbe ormai essere evidente che gli scienziati non imparano mai concetti, leggi e teorie in astratto e per se stesse. Al contrario, questi strumenti intellettuali si manifestano fin dall'inizio come un complesso

storicamente e pedagogicamente anteriore, che li fa conoscere assieme e attraverso le loro applicazioni. Una nuova teoria è sempre annunciata insieme alle sue applicazioni in qualche concreto gruppo di fenomeni naturali; senza di esse, la teoria non potrebbe neppure chiedere di venire accettata. Una volta accettata, la teoria continua ad essere accompagnata da quelle stesse applicazioni o da altre nei manuali da cui i futuri scienziati impareranno la loro professione. Le applicazioni vi si trovano non solo come decorazione o come semplice documentazione. Al contrario, il processo di apprendimento di una teoria dipende dallo studio delle applicazioni, che comprende l'esercizio di risolvere problemi, sia con penna e matita, sia con gli strumenti di laboratorio. Ad esempio, lo studente di dinamica newtoniana scopre il significato di termini come 'forza', 'massa', 'spazio' e 'tempo' non tanto sulla base di definizioni incomplete, sebbene talvolta utili, contenute nel suo manuale, ma osservando e partecipando alla applicazione di questi concetti nella soluzione dei problemi.

Questo processo di apprendimento attraverso l'esercizio o attraverso l'azione continua lungo tutto il processo della iniziazione professionale. Via via che lo studente procede dai corsi del primo anno fino alla sua dissertazione di dottorato, i problemi che si vede assegnati diventano sempre più complessi e con un minor numero di aspetti parziali già risolti. Ma essi continuano ad essere strettamente modellati sui risultati precedentemente accettati come punti fermi, come lo sono i problemi che normalmente lo impegnano durante la sua successiva carriera scientifica indipendente. Siamo liberi di supporre che lo scienziato, ad un certo momento della sua formazione, abbia astratto per intuizione le regole del gioco, ma vi sono scarse ragioni per crederlo. Sebbene parecchi scienziati parlino con estrema facilità delle particolari ipotesi individuali che stanno alla base di un concreto episodio di ricerca corrente, non riescono molto meglio di un profano a caratterizzare le basi generalmente accettate del loro campo, i suoi problemi e i suoi metodi legittimi. E se mai essi hanno appreso astrazioni di questo genere, lo mostrano principalmente attraverso la loro abilità nel condurre una ricerca con successo. Ma questa abilità può essere intesa senza dovere ricorrere ad ipotetiche regole del gioco.

Queste conseguenze dell'educazione scientifica presentano

un'altra facciata che fornisce una terza ragione per supporre che i paradigmi guidino la ricerca non solo attraverso regole astratte ma anche esercitando una diretta attività modellatrice. La scienza normale può procedere senza regole solo fin tanto che la comunità scientifica relativa accetta senza discutere le particolari soluzioni di problemi che sono già state raggiunte. Le regole dovrebbero perciò acquistare importanza, e la caratteristica scarsa considerazione ad esse riservata dovrebbe scomparire, ogniqualvolta i paradigmi o i modelli sono sentiti come insicuri. Questo è esattamente ciò che accade. Il periodo pre-paradigmatico in particolare è regolarmente contrassegnato da frequenti e profonde discussioni circa la legittimità di certi metodi, problemi e modelli di soluzione, sebbene tali discussioni servano piuttosto a definire scuole che a produrre un accordo. Abbiamo già messo in rilievo alcuni di questi dibattiti in ottica ed in elettricità; essi svolsero un ruolo ancora maggiore nello sviluppo della chimica del XVIII secolo e della geologia dell'inizio del XIX secolo {39}. Inoltre, dibattiti come questi non si esauriscono una volta per sempre con la comparsa di un paradigma. Sebbene siano quasi inesistenti durante un periodo di scienza «normale», essi hanno regolarmente luogo poco prima e durante le rivoluzioni scientifiche, ossia in quei periodi in cui, dapprima, i paradigmi sono sottoposti ad attacchi e in seguito soggetti a modificazioni. Il passaggio dalla meccanica newtoniana a quella quantistica sollevò molti dibattiti circa la natura ed i criteri della fisica, dibattiti che in parte continuano ancor oggi {40}. Sono ancora vivi alcuni in grado di ricordare le dispute suscitate dalla teoria elettromagnetica di Maxwell e dalla meccanica statistica {41}. Ed in tempi ancora più lontani, l'assimilazione della meccanica di Galileo e di Newton diede origine ad una serie particolarmente famosa di dibattiti con gli aristotelici, coi cartesiani, e coi leibniziani circa la legittimità di certi criteri scientifici {42}. Quando gli scienziati non sono d'accordo se i problemi fondamentali del loro campo siano stati risolti o no, la ricerca di regole acquista allora un ruolo che ordinariamente non possiede. I paradigmi invece, finché rimangono sicuri, possono funzionare senza che si sia raggiunto un accordo circa la razionalizzazione od addirittura senza che sia stato fatto alcun tentativo per raggiungerlo.

Una quarta ragione per garantire ai paradigmi uno *status* di priorità rispetto a quello di regole e di assunti largamente

condivisi può essere qui illustrata a conclusione di questo capitolo. Nell'introduzione a questo saggio, suggerivamo che accanto a grandi rivoluzioni ve ne possono essere delle piccole, che alcune rivoluzioni si fanno sentire soltanto sui membri di una professione specializzata, e che per tali gruppi specializzati persino la scoperta di un fenomeno nuovo ed inatteso può essere rivoluzionaria. Nel prossimo capitolo illustreremo alcune particolari rivoluzioni di questo genere; ed è ancor lungi dall'essere chiaro come tali rivoluzioni possano esistere. Se la scienza normale è così rigida e se le comunità scientifiche sono così compatte come abbiamo visto nella discussione che precede, come è mai possibile che il cambiamento di un paradigma si faccia sentire soltanto su un piccolo sottogruppo? Può sembrare che ciò che è stato detto finora implichi che la scienza normale è un'unica impresa monolitica ed unitaria, che deve stare in piedi o crollare non solo insieme alla totalità dei suoi paradigmi, ma anche con uno qualsiasi di essi. Ma evidentemente la scienza non è mai così, o lo è soltanto raramente. Spesso, considerando tutti i campi insieme, essa ha invece l'apparenza di una struttura piuttosto sgangherata, con scarsa coerenza fra le sue diverse parti. Ma questa osservazione molto familiare non dovrebbe contrastare in nulla con ciò che è stato detto fin qui. Al contrario, la sostituzione dei paradigmi al posto delle regole dovrebbe rendere più facilmente comprensibile la diversità di campi e delle specializzazioni scientifiche. Regole esplicite, quando ne esistono, sono di solito comuni ad una comunità scientifica relativamente vasta, ma i paradigmi non lo sono necessariamente. Coloro che svolgono attività scientifica in campi molto lontani, come ad esempio l'astronomia e la botanica tassonomica, raggiungono la loro cultura assimilando nozioni abbastanza differenti esposte in testi molto differenti. E persino coloro che, lavorando in campi identici o strettamente collegati, cominciano la loro carriera studiando prevalentemente gli stessi libri ed assimilando le stesse nozioni, possono finire con l'acquisire paradigmi piuttosto differenti nel corso della loro specializzazione.

Si consideri, come unico esempio, la comunità abbastanza vasta e differenziata costituita da tutti i fisici. A ciascun membro di tale gruppo vengono oggi insegnate le leggi della meccanica quantistica, e la maggior parte di essi fanno uso di queste leggi in un qualche momento della loro ricerca o del loro insegnamento.

Ma essi non imparano tutti le stesse applicazioni di quelle leggi, e perciò non vengono influenzati tutti nello stesso modo dai mutamenti che avvengono nella prassi della meccanica quantistica. Nel corso della loro specializzazione professionale, alcuni scienziati si imbattono soltanto nei principi fondamentali della meccanica quantistica; altri studiano in dettagli le applicazioni paradigmatiche di questi principi alla chimica, altri ancora le applicazioni alla fisica degli stati solidi, e così via. Ciò che la meccanica quantistica significa per ciascuno di loro dipende da quali corsi ognuno ha seguito, da quali testi ha studiato e da quali periodici legge. Ne consegue che, sebbene un mutamento della legge della meccanica quantistica avrà carattere rivoluzionario per tutti questi gruppi, un mutamento che si rifletta soltanto sull'una o l'altra delle applicazioni paradigmatiche della meccanica quantistica deve essere rivoluzionario soltanto per i membri di una particolare sezione specializzata di quella professione. Per gli altri membri della professione e per coloro che praticano altre scienze fisiche, quel cambiamento può non apparire affatto rivoluzionario. In breve, sebbene la meccanica quantistica (o la dinamica newtoniana o la teoria elettromagnetica) costituisca un paradigma per molti gruppi scientifici, può non avere lo stesso significato per tutti. Per questa ragione, essa può determinare simultaneamente diverse tradizioni di scienza normale che coincidono in parecchi punti, senza essere coestensive. Una rivoluzione prodotta all'interno di una di queste tradizioni non dovrà necessariamente avere ripercussioni anche sulle altre.

Una breve illustrazione degli effetti della specializzazione può dare ulteriore forza all'intera serie di punti sopraindicati. Un ricercatore che sperava di sapere qualcosa circa l'opinione degli scienziati a proposito della natura della teoria atomica, chiese a un famoso fisico e a un eminente chimico se un singolo atomo di elio fosse una molecola o no. Entrambi risposero senza esitare, ma le loro risposte non furono identiche. Per il chimico l'atomo di elio era una molecola, perché si comportava come tale rispetto alla teoria cinetica dei gas. Per il fisico, d'altra parte, l'atomo di elio non era una molecola, perché non presentava nessuno spettro molecolare {43}. Presumibilmente entrambi parlavano della stessa particella, ma essi la consideravano secondo le differenti prospettive delle loro rispettive formazioni ed attività di ricerca. Le

loro esperienze nel risolvere problemi avevano insegnato loro che cosa doveva essere una molecola. Senza dubbio le loro esperienze avevano avuto molti punti in comune, ma in questo caso, portavano i due specialisti a conclusioni diverse. In seguito scopriremo quali conseguenze possono talvolta avere differenze di paradigmi di questo genere.

Capitolo sesto.

L'anomalia e l'emergere delle scoperte scientifiche

La scienza normale, l'attività risoltrice di rompicapo che abbiamo appena esaminato, è un'impresa altamente cumulativa; essa riesce ad assolvere brillantemente il suo compito che è quello di estendere stabilmente la portata e la precisione della conoscenza scientifica. Sotto tutti questi aspetti, essa collima con grande precisione con l'immagine più comune che ci facciamo del lavoro scientifico. Manca però in questo quadro un prodotto tipico dell'impresa scientifica. La scienza normale non ha per scopo quello di trovare novità di fatto o teoriche e, quando ha successo, non ne trova nessuna. Tuttavia, la ricerca scientifica mette in luce ripetutamente fenomeni nuovi e insospettati, e continuamente teorie radicalmente nuove sono state escogitate dagli scienziati. La storia indica persino che l'impresa scientifica ha sviluppato una tecnica straordinariamente potente per produrre sorprese di questo genere. Se questa caratteristica della scienza deve potersi conciliare con quello che abbiamo detto prima, allora la ricerca governata da un paradigma deve essere una maniera particolarmente efficace di introdurre cambiamenti di paradigma. Le novità fondamentali di fatto e teoriche infatti portano proprio a questo. Prodotte inavvertitamente da un gioco che procede secondo un certo insieme di regole, la loro assimilazione richiede la elaborazione di un altro insieme di regole. Una volta che queste sono diventate parti della scienza, l'impresa scientifica, non è mai esattamente la stessa di prima, almeno per quanto riguarda quegli specialisti nel cui particolare campo di ricerca sono state scoperte le novità.

Dobbiamo ora chiederci come possano verificarsi cambiamenti

di tal genere, e a questo scopo prenderemo in considerazione dapprima le scoperte, o novità di fatto, e quindi le invenzioni, o novità teoriche. Questa distinzione tra scoperte ed invenzioni, o tra fatti e teorie, si dimostrerà subito estremamente artificiosa. La sua artificiosità è una chiave importante per capire parecchie tesi fondamentali di questo saggio. Esaminando, in questo capitolo, alcune scoperte specifiche, troveremo ben presto che esse non sono eventi isolati, ma episodi relativamente estesi nel tempo e dotati di una struttura che si ripresenta regolarmente. La scoperta comincia con la presa di coscienza di una anomalia, ossia col riconoscimento che la natura ha in un certo modo violato le aspettative suscitate dal paradigma che regola la scienza normale; continua poi con una esplorazione, più o meno estesa, dell'area dell'anomalia, e termina solo quando la teoria paradigmatica è stata riadattata, in modo che ciò che appariva anomalo diventi ciò che ci si aspetta. L'assimilazione di un nuovo genere di fatti richiede un adattamento, non semplicemente additivo, della teoria; finché tale adattamento non è completo — finché la scienza non ha imparato a guardare alla natura in maniera differente — i fatti nuovi messi in luce non possono in alcun modo considerarsi fatti scientifici.

Per vedere come sono strettamente intrecciate tra di loro le novità di fatto e quelle teoriche nel corso della scoperta scientifica, esaminiamo un esempio particolarmente famoso, la scoperta dell'ossigeno. Almeno tre scienziati diversi hanno il diritto di attribuirselo, e parecchi altri chimici, verso il 1770, devono avere ottenuto aria arricchita in un recipiente di laboratorio senza saperlo {44}. Il progresso della scienza normale, in questo caso della chimica dei gas, aveva preparato la via ad una rapida avanzata. Fra coloro che per primi pretesero di avere preparato un campione relativamente puro del gas v'era il farmacista svedese C. W. Scheele. Possiamo però ignorare la sua opera, perché fu pubblicata solo dopo che la scoperta dell'ossigeno era stata ripetutamente annunciata da altri scienziati, e così fu priva di effetto sul corso della storia che qui più ci interessa {45}. Il secondo in ordine di tempo ad attribuirsi la scoperta fu lo scienziato e teologo inglese Joseph Priestley, che raccolse il gas liberato dall'ossido rosso di mercurio riscaldato e lo presentò come uno fra i molti risultati ottenuti nel corso di una prolungata ricerca normale sui «tipi di aria» sviluppati da un gran numero di sostanze

solide. Nel 1774 identificò il gas così prodotto come ossido d'azoto e nel 1775, in seguito ad ulteriori esperimenti, come aria comune contenente una quantità di flogisto inferiore al normale. Il terzo pretendente, Lavoisier, cominciò la ricerca che lo portò alla scoperta dell'ossigeno in un tempo successivo agli esperimenti di Priestley del 1774 ed è probabile che sia stato spinto ad iniziartela in seguito ad un suggerimento dello stesso Priestley. All'inizio del 1775 Lavoisier annotò che il gas ottenuto riscaldando l'ossido rosso di mercurio era «l'aria stessa senza alterazione [eccettuato il fatto che]... essa risulta più pura, più respirabile» {46}. Entro il 1777, probabilmente con l'aiuto di un secondo suggerimento di Priestley, Lavoisier era giunto alla conclusione che il gas era un elemento distinto, uno dei due principali costituenti dell'atmosfera, conclusione questa che Priestley non riuscì mai ad accettare.

Questo schema di scoperta solleva una domanda che ci si può fare riguardo ogni nuovo fenomeno di cui gli scienziati abbiano preso coscienza. Chi fu il primo a scoprire l'ossigeno, Priestley o Lavoisier? E chiunque dei due sia stato, quando fu scoperto l'ossigeno? In questa forma la domanda potrebbe essere sollevata anche se fosse esistito solo un pretendente. Non siamo affatto interessati ad una risposta che stabilisca la priorità e la data. Nondimeno, il tentativo di dare una risposta ci serve ad illuminare la natura della scoperta, dal momento che quella risposta non esiste. La scoperta non è un processo su cui si possa porre una domanda di questo tipo. Il fatto che una simile domanda sia stata posta — la priorità della scoperta dell'ossigeno è stata ripetutamente contestata dal 1780 in poi — è sintomo di una distorsione dell'immagine della scienza, che presta alla scoperta un ruolo così fondamentale. Si consideri ancora una volta il nostro esempio. La pretesa di Priestley alla scoperta dell'ossigeno è basata sulla sua priorità nell'aver isolato un gas che più tardi fu riconosciuto come una specie distinta di gas. Ma il campione di Priestley non era puro, e, se tenere in mano ossigeno impuro equivale a scoprirlo, questo era stato fatto da chiunque avesse imbottigliato l'aria dell'atmosfera. Inoltre, se Priestley fu lo scopritore, quando venne fatta la scoperta? Nel 1774 egli credeva di avere ottenuto ossido d'azoto, una specie che gli era già nota; nel 1775 considerò il gas come aria deflogistizzata, ciò che non è ancora ossigeno e neppure una specie di gas del tutto imprevista per i chimici del flogisto. La pretesa di Lavoisier può sembrare più

fondata, ma essa solleva il medesimo genere di problemi. Se rifiutiamo la palma a Priestley, non possiamo darla a Lavoisier per la sua ricerca del 1775 che lo portò ad identificare il gas come «l'aria stessa». Forse dobbiamo aspettare la ricerca del 1776 o del 1777, che portò Lavoisier non semplicemente a vedere il gas, ma a capire che cosa tale gas era. Tuttavia anche questo riconoscimento potrebbe essere messo in dubbio, giacché nel 1777 e per tutta la vita Lavoisier insistette a sostenere che l'ossigeno era un «principio di acidità» atomico e che gas di ossigeno veniva formato soltanto quando quel «principio» si univa al calorico, la materia del calore {47}. Dovremo perciò dire che l'ossigeno non era ancora stato scoperto nel 1777? Qualcuno potrebbe essere tentato di farlo. Ma il principio di acidità non fu bandito dalla chimica fino a dopo il 1810, ed il concetto di calorico sopravvisse fino al 1860. L'ossigeno era diventato una sostanza chimica comunemente riconosciuta prima di entrambe queste date.

È ovvio che abbiamo bisogno di un nuovo vocabolario e di nuovi concetti per analizzare eventi come quello della scoperta dell'ossigeno. Sebbene sia senza dubbio corretta, la proposizione «L'ossigeno fu scoperto» porta fuori strada, perché fa pensare che scoprire qualcosa consista in un unico, semplice atto assimilabile al nostro abituale (ma anch'esso discutibile) concetto di vedere. È questa la ragione per la quale ci siamo convinti tanto facilmente che scoprire, come vedere o toccare, dovrebbe poter essere inequivocabilmente attribuito a un individuo e a un particolare momento del tempo. Ma quest'ultima attribuzione è sempre impossibile, e la prima spesso lo è altrettanto. Ignorando Scheele, possiamo con tutta sicurezza affermare che l'ossigeno non era stato scoperto prima del 1774, e potremmo forse anche affermare che esso era stato scoperto prima del 1777 o poco dopo. Ma entro questi limiti, od altri analoghi, ogni tentativo per datare la scoperta dell'ossigeno deve inevitabilmente apparire arbitrario, poiché scoprire un nuovo genere di fenomeno è necessariamente un evento complesso, che richiede che si riconosca tanto *che c'è* qualcosa quanto *che cosa è*. Si noti, ad esempio, che se l'ossigeno fosse per noi aria deflogistizzata, dovremmo senza esitare sostenere che Priestley l'ha scoperto, sebbene non sappiamo quando esattamente. Ma se l'osservazione e la concettualizzazione, il fatto e la sua assimilazione alla teoria, sono

entrambi inseparabilmente collegati nella scoperta, allora la scoperta è un processo e richiede un certo tempo. Soltanto quando tutte le categorie concettuali attinenti ad esso sono pronte in anticipo, nel qual caso il fenomeno non sarebbe di un genere nuovo, la scoperta del *che* e la scoperta del *che cosa* possono aver luogo assieme, senza alcuno sforzo e in un solo istante.

Diamo ora per scontato che la scoperta implica un processo di assimilazione concettuale esteso nel tempo, sia pure non necessariamente lungo. Possiamo dire anche che esso comporta un mutamento nel paradigma? A una domanda di questo genere non si può dare ancora una risposta generale, ma almeno in questo caso, la risposta deve essere affermativa. Ciò che Lavoisier venne annunciando nei suoi articoli dal 1777 in poi non era tanto la scoperta dell'ossigeno, quanto la teoria della combustione per opera dell'ossigeno. Questa teoria fu la chiave di volta per una riformulazione della chimica così vasta che di solito è indicata col nome di rivoluzione chimica. Infatti, se la scoperta dell'ossigeno non fosse stata intimamente connessa all'emergere di un nuovo paradigma per la chimica, la questione della priorità, dalla quale abbiamo preso le mosse, non sarebbe mai parsa tanto importante. In questo come in altri casi, il valore conferito ad un fenomeno nuovo, e quindi al suo scopritore, varia col variare della nostra valutazione della misura in cui il fenomeno ha violato le anticipazioni suggerite dal paradigma. Si noti però, perché sarà importante in seguito, che la scoperta dell'ossigeno non fu di per se stessa la causa del mutamento avvenuto nella teoria chimica. Già molto tempo prima di avvicinarsi alla scoperta del nuovo gas, Lavoisier si era convinto che vi fosse qualcosa di sbagliato nella teoria del flogisto e che i corpi che bruciano assorbono una parte dell'atmosfera. Questo era quanto egli aveva registrato in una nota sigillata depositata presso il segretario dell'Accademia francese nel 1772 {48}. Le sue ricerche sull'ossigeno non fecero che dare sempre più corpo e struttura alla sua primitiva sensazione che vi fosse qualcosa di sbagliato. Quella ricerca gli fece conoscere qualcosa che egli era già preparato a scoprire: la natura della sostanza che la combustione rimuove dall'atmosfera. Una tale acuta coscienza delle difficoltà deve avere aiutato in maniera significativa Lavoisier a riconoscere in esperimenti simili a quelli di Priestley un gas che Priestley non era stato in grado di vedere. D'altra parte, per vedere ciò che vide Lavoisier era necessaria la

revisione di un paradigma fondamentale e questo fatto deve essere la ragione principale per cui Priestley non ci riuscì per tutta la sua lunga esistenza.

Due altri esempi, un po' più brevi, rafforzeranno ciò che è stato detto sin qui e al tempo stesso, attraverso un chiarimento della natura delle scoperte, ci faranno comprendere le circostanze nelle quali esse compaiono nella scienza. Allo scopo di mettere in luce le diverse forme principali secondo cui le scoperte si possono verificare, ho scelto esempi diversi l'uno dall'altro e diversi entrambi dalla scoperta dell'ossigeno. Il primo esempio, quello che riguarda i raggi X, è un caso classico di scoperta dovuta al caso, un tipo di scoperta che ha luogo più spesso di quanto gli impersonali modelli di relazione scientifica ci permettano di constatare. La storia di quella scoperta inizia il giorno in cui il fisico Rontgen interruppe una ricerca normale sui raggi catodici, poiché aveva notato che uno schermo di platino-cianuro di bario collocato ad una certa distanza dal suo apparecchio schermato diventava incandescente quando era in corso la scarica. Ulteriori ricerche — esse richiesero sette estenuanti settimane durante le quali Rontgen raramente abbandonò il laboratorio — indicarono che la causa del fenomeno proveniva direttamente dal tubo a raggi catodici, che le radiazioni proiettavano uno spettro che non poteva venire deviato da un magnete, e molti altri effetti. Prima di annunciare la sua scoperta, Rontgen si era convinto che l'effetto scoperto non era dovuto ai raggi catodici, ma ad un agente che presentava almeno qualche somiglianza con la luce {49}.

Persino una esposizione così sommaria mette in luce una straordinaria somiglianza con la scoperta dell'ossigeno: prima di fare esperimenti con l'ossido rosso di mercurio, Lavoisier aveva eseguito esperimenti che non producevano i risultati prevedibili in base al paradigma del flogisto; la scoperta di Rontgen cominciò col riconoscimento che il suo schermo diventava incandescente quando non avrebbe dovuto farlo. In entrambi i casi, la percezione di un'anomalia — di un fenomeno cioè per il quale il paradigma non aveva preparato il ricercatore — svolse un ruolo essenziale nel preparare la via alla percezione di una novità. Ma, ancora in entrambi i casi, la percezione di qualcosa che non funzionava fu soltanto un preludio alla scoperta. Né l'ossigeno né i raggi X emersero senza un ulteriore processo di sperimentazione e di assimilazione. A che punto delle ricerche di Rontgen, ad esempio,

possiamo dire che siano stati effettivamente scoperti i raggi X? In ogni caso non nel primo istante, allorché tutto quello che era stato osservato si riduceva ad uno schermo incandescente. Qualche altro ricercatore aveva certamente visto questo stesso fenomeno, senza però scoprire nulla, con suo successivo rammarico {50}. Ed è quasi altrettanto evidente che il momento della scoperta non può neppure essere cercato molto più tardi, nell'ultima settimana di ricerche, quando Rontgen stava già esplorando le proprietà della nuova radiazione, che egli aveva già scoperto. Possiamo soltanto dire che i raggi X vennero alla luce a Wurzburg tra l'8 novembre e il 28 dicembre 1895.

Da un punto di vista, però, l'esistenza di analogie significative tra la scoperta dell'ossigeno e quella dei raggi X è molto meno evidente. Diversamente dalla scoperta dell'ossigeno, quella dei raggi X non fu implicata, almeno nei dieci anni che seguirono, in nessuna evidente rivoluzione della teoria scientifica. In che senso, allora, si può dire che l'assimilazione di quella scoperta ha reso necessario un cambiamento di paradigma? Le ragioni per negare un simile cambiamento sono molto forti. Certo, i paradigmi seguiti da Rontgen e dai suoi contemporanei non avrebbero potuto essere usati per prevedere i raggi X (la teoria elettromagnetica di Maxwell non era ancora stata universalmente accettata, e la teoria corpuscolare dei raggi catodici era soltanto una delle numerose speculazioni correnti). Ma quei paradigmi neppure escludevano, almeno in maniera evidente, l'esistenza dei raggi X, come invece la teoria del flogisto non poteva ammettere la interpretazione data da Lavoisier del gas osservato da Priestley. Al contrario, la teoria e la prassi scientifiche generalmente accettate nel 1895 ammettevano l'esistenza di numerose forme di radiazione, visibile, infrarossa, ultravioletta. Perché i raggi X non poterono venire accettati semplicemente come un'altra forma di una classe ben nota di fenomeni? Perché non furono accolti come ad esempio, veniva accolta la scoperta di un nuovo elemento chimico? Al tempo di Rontgen dovevano ancora essere cercati e trovati elementi nuovi che occupassero i posti vuoti della tavola periodica. La loro ricerca costituiva un programma di lavoro tipico della scienza normale, e il successo era soltanto motivo di soddisfazione, non di sorpresa.

La scoperta dei raggi X, invece, suscitò non solo sorpresa, ma anche profonda impressione. Lord Kelvin affermò recisamente in un primo momento che si trattava di un artefatto {51}. Altri,

sebbene non potessero metterne in dubbio l'evidenza, ne rimasero chiaramente sconcertati. I raggi X, sebbene non fossero in contraddizione con la teoria accettata, contraddicevano aspettative profondamente radicate. Queste aspettative, io penso, erano implicite nella progettazione e nell'interpretazione dei procedimenti di laboratorio correnti. Intorno al 1890, l'attrezzatura dei raggi catodici era largamente in uso in numerosi laboratori europei. Se l'apparecchio di Rontgen aveva prodotto raggi X, era probabile che anche numerosi altri sperimentatori avessero in qualche occasione prodotti gli stessi raggi senza rendersene conto. Forse quei raggi, che potevano benissimo avere anche altre origini sconosciute, erano impliciti in fenomeni che erano stati precedentemente spiegati senza fare riferimento ad essi. Quanto meno, parecchi tipi di apparecchi in uso da lungo tempo avrebbero dovuto in futuro venire schermati con piombo. Ricerche che erano state precedentemente realizzate sulla base di programmazioni normali, avrebbero dovuto ora venire ripetute, perché gli scienziati precedenti non erano riusciti a riconoscere e a controllare una variabile che vi era implicata. Certo, i raggi X aprivano un campo nuovo e così accrescevano il dominio potenziale della scienza normale. Ma essi, ed è questo il punto che ora ci interessa, modificavano i campi che già esistevano. Nel corso di tale processo, essi negarono agli strumenti fino allora ritenuti coerenti col paradigma il diritto ad essere ancora considerati tali.

In breve, la decisione di usare una particolare apparecchiatura e di usarla in un particolare modo indica che si dà per scontato in forma più o meno cosciente che si dovranno verificare solo circostanze di un certo tipo. Vi sono, oltre alle aspettative teoriche, anche quelle strumentali, e queste hanno spesso svolto un ruolo decisivo nello sviluppo scientifico. Una aspettativa del genere per esempio spiega in parte il ritardo nella scoperta dell'ossigeno. Usando una prova convenzionale della «bontà dell'aria», sia Priestley che Lavoisier mescolarono due volumi del loro gas con un volume di ossido d'azoto, agitarono la miscelanza insieme all'acqua, e misurarono il volume del residuo gassoso. L'esperienza precedente, da cui derivava questo procedimento convenzionale, assicurava che con l'aria della atmosfera il residuo sarebbe stato di un volume, mentre con ogni altro gas (e con l'aria inquinata) sarebbe stato maggiore. Negli esperimenti con

l'ossigeno essi trovarono che il residuo era all'incirca un volume e identificarono il gas in accordo col presupposto di partenza. Solo molto più tardi, e in parte per un caso, Priestley abbandonò il procedimento convenzionale e provò a mescolare l'ossido nitrico con il suo gas in proporzioni diverse. Trovò allora che con un volume quadruplo di ossido nitrico non si formava quasi nessun residuo. Accettare il procedimento di prova tradizionale — procedimento che era stato sanzionato da gran parte dell'esperienza precedente — aveva significato al tempo stesso accettare la negazione dell'esistenza di gas che potevano comportarsi come l'ossigeno {52}.

Potrebbero venire ricordati numerosi casi di questo genere come per esempio la ritardata identificazione della fissione dell'uranio. Una ragione per la quale quella reazione nucleare si dimostrò particolarmente difficile da riconoscere è dovuta al fatto che coloro che sapevano che cosa ci si doveva aspettare quando si bombardava l'uranio scelsero prove chimiche adatte a mettere in evidenza principalmente gli elementi appartenenti all'estremo superiore della tavola periodica {53}. Dovremmo dunque concludere, dalla frequenza con cui tali condizionamenti strumentali si dimostrano fuorviati, che la scienza dovrebbe abbandonare prove e strumenti convenzionali? Ciò darebbe luogo ad un metodo di ricerca inconcepibile. I procedimenti e le applicazioni coerenti con il paradigma sono altrettanto necessari alla scienza quanto le leggi e le teorie paradigmatiche e hanno gli stessi effetti. È inevitabile che restringano il campo dei fenomeni accessibile all'indagine scientifica in ogni dato momento storico. Se ci rendiamo conto di questo, possiamo al tempo stesso capire in che senso essenziale una scoperta come quella dei raggi X renda necessario un cambiamento di paradigma — e perciò un cambiamento sia dei procedimenti che delle aspettative — per un settore specifico della comunità scientifica. Di conseguenza, possiamo anche capire come la scoperta dei raggi X potè dare l'impressione di avere aperto un mondo nuovo a molti scienziati e in tal modo potè contribuire così efficacemente alla crisi che portò alla fisica del xx secolo.

Il nostro ultimo esempio di scoperta scientifica, quello della bottiglia di Leyda, appartiene ad una classe che può essere descritta come la classe delle scoperte indotte dalla teoria. In un primo momento il termine potrebbe apparire paradossale. Gran

parte di quello che è stato detto finora suggerisce che le scoperte previste in anticipo dalla teoria fanno parte della scienza normale e non portano alla luce nessun nuovo genere di fatti. Come esempi di scoperte derivanti dalla scienza normale in quel modo ho citato precedentemente la scoperta di nuovi elementi chimici durante la seconda metà del XIX secolo. Ma non tutte le teorie sono teorie paradigmatiche. Sia nel periodo che precede la formulazione dei paradigmi che durante le crisi che portano a mutamenti radicali del paradigma gli scienziati sono soliti sviluppare molte teorie congetturali e inarticolate che possono esse stesse indicare la via alla scoperta. Spesso, però, questa scoperta non è esattamente quella anticipata dalle ipotesi congetturali e provvisorie. Solo quando l'esperimento e la teoria provvisoria si confrontano e si articolano l'uno con l'altra, la scoperta emerge e la teoria diventa un paradigma.

La scoperta della bottiglia di Leyda presenta tutte queste caratteristiche, assieme alle altre che abbiamo osservato in precedenza. All'inizio non esisteva un unico paradigma per la ricerca elettrica. Al contrario, esistevano numerose teorie, in concorrenza tra loro, derivate tutte da fenomeni relativamente accessibili. Nessuna di esse riusciva pienamente a dare un ordine all'intera varietà di fenomeni elettrici. Questa incapacità era all'origine di parecchie anomalie che costituiscono il presupposto per la scoperta della bottiglia di Leyda. Una delle scuole dei teorici dell'elettricità in concorrenza tra loro affermava che l'elettricità è un fluido e tale concezione indusse numerosi scienziati a tentare di imbottigliare il fluido tenendo in mano una fiala di vetro piena di acqua e mettendo l'acqua in contatto con un conduttore attaccato ad un generatore elettrostatico in attività. Allontanando la bottiglia dalla macchina e toccando l'acqua (o un conduttore collegato ad essa) con l'altra mano libera, ciascuno di questi sperimentatori provava una forte scossa. Quei primi esperimenti, però, non fornirono ai teorici dell'elettricità la bottiglia di Leyda. Tale dispositivo emerse a poco a poco e, ancora una volta, è impossibile dire con esattezza quando la sua scoperta fu compiuta.

I tentativi iniziali per immagazzinare fluido elettrico funzionavano solo perché gli sperimentatori tenevano la fiala in mano e poggiavano i piedi a terra. I teorici dell'elettricità dovevano ancora imparare che la bottiglia richiedeva un rivestimento conduttore sia esterno che interno, e che in realtà il fluido non

veniva affatto immagazzinato nella bottiglia. Ad un certo momento nel corso delle ricerche che mostrarono loro queste cose e che fecero loro conoscere parecchi altri effetti anomali, venne fuori il dispositivo che siamo soliti chiamare bottiglia di Leyda. Inoltre, gli esperimenti, parecchi dei quali furono eseguiti da Franklin, che portarono alla sua costruzione furono anche quelli che resero necessaria una drastica revisione della teoria del fluido elettrico e fornirono così all'elettricità il suo primo paradigma completo {54}.

In misura maggiore o minore (che corrisponde alla maggiore o minore novità della scoperta, che va da quella che produce una profonda impressione a quella che costituisce solo un risultato anticipato), le caratteristiche comuni ai tre esempi che abbiamo menzionati sopra si ritrovano anche in tutte le scoperte dalle quali emergono nuovi generi di fenomeni. Queste caratteristiche comprendono: la previa presa di coscienza dell'anomalia, la graduale e simultanea emergenza del loro riconoscimento sia sul piano delle osservazioni che su quello dei concetti, ed il conseguente mutamento, spesso accompagnato da resistenze, di procedimenti e categorie paradigmatiche. Vi sono persino prove del fatto che queste caratteristiche sono incorporate nella natura del processo percettivo stesso. In un esperimento psicologico, che meriterebbe di essere più largamente conosciuto al di fuori del suo campo professionale, Bruner e Postman chiesero ai soggetti che si prestavano all'esperimento di identificare una serie di carte da gioco che venivano mostrate per breve tempo ed in maniera controllata. Parecchie delle carte erano normali, ma alcune presentavano qualche anomalia, come ad esempio un sei di picche rosso ed un quattro di cuori nero. Ciascuna serie di esperimenti consisteva nel presentare le carte ad un soggetto facendogliele vedere una per una e per tempi gradualmente crescenti. Ad ogni carta mostrata, veniva chiesto al soggetto che cosa avesse visto e la serie aveva termine quando si ottenevano due successive identificazioni corrette {55}.

Parecchi soggetti identificarono la maggior parte delle carte anche quando il tempo di esposizione era fra i più brevi e, dopo un leggero aumento del tempo di esposizione, tutti i soggetti identificarono tutte le carte. Per quanto riguarda le carte normali, queste identificazioni erano solitamente corrette, ma le carte anomale venivano quasi sempre identificate, senza alcuna esitazione o perplessità, come carte normali. Il quattro di cuori

nero, ad esempio, poteva venire identificato come quattro di picche o come quattro di cuori. Senza avvertire minimamente una difficoltà, esso veniva fatto rientrare immediatamente entro una delle categorie concettuali preparate dalla esperienza precedente. Non si potrebbe neppure dire che i soggetti avevano visto qualcosa di diverso da quello che identificavano. Col crescere del tempo d'esposizione delle carte anomale, i soggetti cominciavano ad esitare e a mostrare coscienza dell'anomalia. Messo di fronte, per esempio, al sei di picche rosso, qualcuno poteva dire: E' il sei di picche, ma c'è qualcosa che non va; il nero ha un bordo rosso. Aumentando ancora il periodo di esposizione, si manifestavano una esitazione e una confusione ancor maggiori, finché finalmente, e talvolta abbastanza all'improvviso, la maggior parte dei soggetti dava l'identificazione corretta senza esitazione. Quando poi qualcuno aveva riconosciuto correttamente due o tre delle carte anomale, e non avrebbe trovato difficile fare lo stesso con le altre. Alcuni soggetti, però, non furono mai in grado di operare il necessario riadattamento delle loro categorie. Anche con un tempo di esposizione quaranta volte più lungo di quello normalmente richiesto per riconoscere le carte normali, più del 10 per cento delle carte anomale non vennero identificate correttamente. Ed i soggetti che non riuscivano, spesso provavano un'acuta frustrazione. Uno di essi esclamò: «Non riesco a decifrare il seme, qualunque sia. Questa volta non aveva neppure l'aspetto di una carta. Non so che colore ha ora e se è un picche o un cuori. Non sono neppure sicuro ora su come è fatto un picche. Dio mio!» {56}. Nel prossimo capitolo vedremo che in qualche caso anche gli scienziati si comportano in questo modo.

Sia inteso come una metafora, o perché riflette la natura della mente umana, quell'esperimento psicologico fornisce un meraviglioso modello, semplice e convincente, del processo della scoperta scientifica. Nella scienza, come nell'esperimento delle carte da gioco, la novità emerge soltanto con difficoltà, che si manifesta attraverso la resistenza, in contrasto con un sottofondo costituito dalla aspettazione. All'inizio, si percepisce soltanto ciò che si aspetta e che è usuale, persino in circostanze nelle quali più tardi l'anomalia viene a essere rilevata. Una osservazione successiva però permette di rendersi conto che c'è qualcosa di sbagliato o collega l'effetto con qualcosa che era sbagliato prima. Tale presa di coscienza dell'anomalia apre un periodo in cui le

categorie concettuali vengono riadattate, finché ciò che inizialmente appariva anomalo sia diventato qualcosa che ci si aspetta. A questo punto la scoperta è stata compiuta. Ho già sottolineato che un processo uguale o molto simile a questo si verifica nell'emergenza di tutte le novità scientifiche fondamentali. Vorrei ora richiamare l'attenzione sul fatto che, rendendoci conto di questo processo, possiamo finalmente cominciare a capire perché la scienza normale, una ricerca che non è diretta a mettere in luce le novità e che anzi tende a sopprimerle, nondimeno è così efficace nel farle nascere.

Nel corso dello sviluppo di ogni scienza, il paradigma che viene accettato in un primo tempo è di solito considerato capace di spiegare con successo la maggior parte delle osservazioni e degli esperimenti che sono facilmente accessibili a coloro che lavorano in quel campo. L'ulteriore sviluppo, però, richiede di solito la costruzione di una elaborata apparecchiatura, lo sviluppo di un vocabolario e di tecniche esoteriche e un raffinamento dei concetti, che comporta una progressiva diminuzione della loro rassomiglianza coi loro prototipi usati dal senso comune. Tale specializzazione porta, da un lato, ad un estremo restringimento della visione dello scienziato e a una considerevole resistenza a ogni mutamento di paradigma: la scienza è diventata sempre più rigida; d'altro lato, all'interno di quei settori sui quali il paradigma richiama l'attenzione del gruppo, la scienza normale permette di raggiungere informazioni così dettagliate e a una corrispondenza così precisa tra l'osservazione e la teoria che non si potrebbero ottenere in alcun altro modo. Inoltre quelle informazioni e quella corrispondenza hanno un valore che trascende il loro valore intrinseco, che non sempre è molto alto. Senza l'apparecchiatura specifica, costruita principalmente per assolvere le funzioni previste dal paradigma, i risultati che alla fine producono la novità non potrebbero mai manifestarsi. Ed anche quando l'apparecchiatura esiste, la novità di solito emerge soltanto per colui che, conoscendo *con precisione* che cosa dovrebbe aspettarsi, è in grado di rendersi conto che qualcosa non funziona. L'anomalia è visibile soltanto sullo sfondo fornito dal paradigma. Quanto più preciso è tale paradigma e quanto più vasta è la sua portata, tanto più riuscirà a rendere sensibili alla comparsa di un'anomalia e quindi di un'occasione per cambiare il paradigma. Nella forma normale in cui una scoperta ha luogo, perfino la

resistenza al cambiamento ha un'utilità, che verrà esaminata più dettagliatamente nel prossimo capitolo. Tale resistenza, assicurando che il paradigma non si arrenderà troppo facilmente, è una garanzia che gli scienziati non verranno distratti facilmente e che le anomalie che portano a un cambiamento del paradigma metteranno in discussione tutto l'insieme di conoscenze acquisite fino ad allora. Il fatto stesso che una novità scientifica significativa spesso emerge contemporaneamente da parecchi laboratori è un'indicazione sia della natura fortemente tradizionale della scienza normale, sia della completezza con cui la ricerca tradizionale prepara la via al proprio cambiamento.

Capitolo settimo.

La crisi e l'emergere di teorie scientifiche

Tutte le scoperte esaminate nel capitolo vi producevano contribuivano a produrre mutamenti di paradigma. Questi mutamenti, inoltre, erano tutti al tempo stesso distruttivi e costruttivi. Una volta assimilata la scoperta, gli scienziati erano in grado di spiegare una sfera più vasta di fenomeni naturali e di dare una spiegazione più precisa di alcuni di quelli conosciuti precedentemente. Ma questo vantaggio veniva raggiunto soltanto in seguito all'abbandono di alcune opinioni o di alcuni procedimenti precedentemente accettati e, al tempo stesso, in seguito alla sostituzione di quelle componenti del precedente paradigma con altri. Ho dimostrato che spostamenti di questo genere si accompagnano a tutte le scoperte ottenute attraverso la scienza normale, fatta eccezione soltanto per quelle che non costituiscono una sorpresa e che erano state anticipate quasi in tutto eccetto che nei loro particolari. Le scoperte, però, non sono le sole fonti di questi mutamenti, insieme distruttivi e costruttivi di paradigmi. In questo capitolo cominceremo a prendere in considerazione i cambiamenti analoghi, ma di solito di portata molto più vasta, che derivano dalla invenzione di nuove teorie.

Avendo già visto che, nelle scienze, fatti e teorie, scoperte ed invenzioni non sono categoricamente e permanentemente distinti, possiamo prevedere che fra questo capitolo ed il precedente vi saranno parecchi punti in comune. (L'ipotesi impossibile che dapprima Priestley scopersse l'ossigeno e poi Lavoisier lo inventò, è certo attraente. Abbiamo già incontrato l'ossigeno come scoperta; Era breve lo incontreremo ancora come invenzione). Esaminando l'emergere di nuove teorie, finiremo inevitabilmente con l'estendere anche la nostra comprensione delle scoperte.

Tuttavia, coincidenza in molti punti non significa identità. Le scoperte del tipo di quelle prese in considerazione nel capitolo precedente non furono responsabili, almeno prese singolarmente, di una sostituzione del paradigma paragonabile alla rivoluzione copernicana, a quella newtoniana, a quella chimica o a quella einsteiniana. E non furono nemmeno responsabili di mutamenti del paradigma un po' più modesti in quanto riguardavano un campo specialistico più limitato quali quelli prodotti dalla teoria ondulatoria della luce, dalla teoria dinamica del calore o dalla teoria elettromagnetica di Maxwell. Come è possibile che teorie di questo genere sorgano sul terreno della scienza normale, un'attività che ancor meno si propone di farle sorgere di quanto non si proponga di favorire le scoperte?

Se la presa di coscienza di una anomalia ha una funzione nell'emergere di un nuovo genere di fenomeni, non dovrebbe sorprendere nessuno il fatto che una presa di coscienza analoga, ma ancor più profonda, debba precedere ogni mutamento accettabile della teoria. Su questo punto penso che l'evidenza storica è assolutamente inequivocabile. Lo stato dell'astronomia tolemaica era scandaloso prima delle modificazioni introdotte da Copernico {57}. I contributi di Galileo allo studio del movimento furono stimolati direttamente dalle difficoltà che i critici scolastici avevano scoperto nella teoria aristotelica {58}. La nuova teoria della luce e del colore presentata da Newton nacque quando ci si rese conto che nessuna delle teorie pre-paradigmatiche esistenti sarebbe riuscita a spiegare la lunghezza dello spettro, e la teoria ondulatoria che sostituì quella newtoniana venne annunciata in un clima di preoccupazione crescente a causa delle anomalie che gli effetti di diffrazione e di polarizzazione presentavano in rapporto alla teoria newtoniana {59}. La termodinamica nacque dal contrasto fra due teorie fisiche esistenti nel XIX secolo, e la meccanica quantistica da una serie di difficoltà che riguardavano la radiazione dei corpi neri, il calore specifico, e l'effetto fotoelettrico {60}. Inoltre, in tutti questi casi, eccettuato quello di Newton, la coscienza dell'anomalia era durata così a lungo ed era penetrata così a fondo che, si può dire senza esagerazione, i campi toccati da essa si trovavano in uno stato di crisi crescente. Poiché richiede una distruzione su larga scala dei paradigmi e modificazioni fondamentali nei problemi e nelle tecniche della scienza normale, l'emergere di nuove teorie è generalmente preceduta da un

periodo di profonda incertezza nel campo della specializzazione interessata. Come ci si può aspettare, tale incertezza è generata dalla persistente incapacità dei rompicapi della scienza normale a risolvere i problemi che le si presentano. Il fallimento delle regole esistenti è una necessaria preparazione per la ricerca di regole nuove.

Si consideri innanzitutto un caso particolarmente famoso di mutamento di paradigma: la nascita dell'astronomia copernicana. Quando la teoria precedente, il sistema tolemaico, fu sviluppata per la prima volta nel corso degli ultimi due secoli prima di Cristo e dei primi due dopo Cristo, esso riusciva meravigliosamente a prevedere le mutevoli posizioni sia delle stelle che dei pianeti. Nessun altro sistema antico aveva funzionato così bene; per le stelle, l'astronomia tolemaica è ancor oggi largamente usata quando si richiedono valutazioni approssimate; per quanto riguarda i pianeti, le previsioni di Tolomeo erano altrettanto buone di quelle di Copernico. Ma un successo straordinario non è mai, per una teoria scientifica, un successo completo. Sia per quanto riguarda la posizione dei pianeti che per la processione degli equinozi, le previsioni fatte in base al sistema tolemaico non corrispondevano mai perfettamente alle migliori osservazioni disponibili. La necessità di ridurre ulteriormente quelle discrepanze sta alla base di molti dei principali problemi della ricerca astronomica normale affrontati dai successori di Tolomeo, proprio come un analogo tentativo per fare collimare le osservazioni celesti con la teoria newtoniana fornì problemi di ricerca «normale» ai successori di Newton del XVIII secolo. Per qualche tempo gli astronomi ebbero tutte le ragioni per supporre che questi tentativi sarebbero stati coronati da successo, così come lo erano stati quelli che avevano portato al sistema di Tolomeo. Di fronte ad una data discrepanza, gli astronomi erano stati ogni volta in grado di eliminarla introducendo qualche particolare riadattamento nel sistema tolemaico di cerchi composti. Ma col passare del tempo, chi avesse guardato al risultato complessivo degli sforzi fatti da parecchi astronomi nel quadro della ricerca normale avrebbe osservato che la complessità dell'astronomia cresceva ad un ritmo molto più rapido della sua accuratezza e che una discrepanza corretta in un punto aveva probabilità di saltar fuori in un altro {61}.

Poiché la tradizione astronomica fu più volte interrotta per

ragioni estranee e poiché, in assenza della stampa, le possibilità di comunicazione tra gli astronomi erano molto limitate, queste difficoltà furono riconosciute solo lentamente. Ma alla fine se ne ebbe coscienza. Nel XIII secolo, Alfonso X poteva dichiarare che se Dio lo avesse consultato quando stava creando l'universo, gli avrebbe potuto dare dei buoni consigli. Nel XVI secolo, un collaboratore di Copernico, Domenico da Novara, sosteneva che era impossibile che un sistema così farraginoso e poco preciso come era diventato allora il sistema tolemaico potesse essere vero per la natura. E Copernico stesso, nella prefazione al *De revolutionibus*, scriveva che la tradizione astronomica che egli aveva ereditato aveva finito col creare semplicemente un mostro. Fin dall'inizio del XVI secolo, i migliori astronomi d'Europa in numero sempre crescente riconoscevano che il paradigma dell'astronomia non era riuscito a risolvere i suoi problemi tradizionali. Questo riconoscimento preparò il terreno sul quale fu possibile a Copernico abbandonare il paradigma tolemaico ed elaborarne uno nuovo. La sua famosa prefazione costituisce ancor oggi una descrizione classica di uno stato di crisi {62}.

L'insuccesso della normale attività tecnica di risolvere rompicapo non è, naturalmente, l'unico aspetto della crisi dell'astronomia che Copernico si trovò di fronte. In una trattazione ampia di quella crisi dovrebbe essere presa in considerazione anche la pressione sociale per una riforma del calendario, pressione che rese particolarmente urgente risolvere il rompicapo della precessione degli equinozi. Oltre a ciò, un resoconto più completo di quella crisi dovrebbe prendere in considerazione la critica medievale di Aristotele, il sorgere del neoplatonismo rinascimentale ed altri significativi elementi storici. Ma l'insuccesso tecnico continuerebbe ancora a costituire il nucleo della crisi. In una scienza matura — e l'astronomia era diventata tale nell'antichità — dei fattori esterni come quelli citati sopra sono importanti soprattutto nel determinare il momento in cui scoppierà la crisi, la facilità con cui essa può venire riconosciuta e l'area in cui si manifesterà per la prima volta l'insuccesso, data la particolare attenzione che essa riceve. Per quanto abbiano una grandissima importanza, questioni di tal genere vanno al di là dei limiti di questo saggio.

Se questo è abbastanza chiaro nel caso della rivoluzione copernicana, esaminiamo ora un altro esempio, piuttosto

differente: la crisi che precedette l'emergere della teoria di Lavoisier sulla funzione dell'ossigeno nella combustione. Nel 1770 parecchi fattori contribuirono a far maturare la crisi nel campo della chimica; gli storici non si trovano tutti d'accordo a proposito della natura e dell'importanza relativa di quei fattori. Ma due di essi sono generalmente riconosciuti come estremamente importanti: la nascita della chimica dei gas e la questione dei rapporti ponderali. La storia della chimica dei gas comincia nel XVII secolo con la introduzione della pompa ad aria e con l'uso di essa negli esperimenti chimici. Nel corso del secolo seguente, adoperando quella pompa e altri numerosi dispositivi pneumatici dello stesso genere, i chimici si resero conto in maniera sempre più chiara che l'aria doveva costituire un ingrediente attivo nelle reazioni chimiche. Ma tranne poche eccezioni — così equivocate che poteva darsi non fossero affatto eccezioni — i chimici continuarono a credere che l'aria fosse l'unica specie di gas esistente. Fino al 1756, quando Joseph Black mostrò che l'aria fissata (CO_2) poteva venire chiaramente distinta dall'aria normale, si pensava che due campioni di gas potessero differire soltanto per il loro diverso tipo e grado di impurezza {63}.

Dopo le ricerche di Black, lo studio dei gas avanzò rapidamente, soprattutto per merito di Cavendish, di Priestley e di Schede, i quali elaborarono numerose tecniche nuove che permettevano di distinguere un tipo di gas da un altro. Tutti costoro, da Black a Schede, credevano nella teoria del flogisto e spesso la usavano nel progettare e nell'interpretare i loro esperimenti. Di fatto, Scheele produsse per la prima volta l'ossigeno attraverso una complicata catena di esperimenti miranti a deflogistizzare il calore. Tuttavia, come risultato complessivo, i loro esperimenti produssero una tale varietà di tipi di gas e fecero conoscere le proprietà di questi gas in modo tanto accurato, che la teoria del flogisto si dimostrò sempre meno capace di far fronte alle esperienze di laboratorio. Sebbene nessuno di quei chimici avesse suggerito l'idea che la teoria andava cambiata, essi si dimostrarono incapaci di applicarla in modo coerente. Quando nei primi anni del decennio 1770-80 Lavoisier cominciò i suoi esperimenti sui diversi tipi di aria, v'erano quasi altrettante versioni della teoria del flogisto quanti erano i chimici che studiavano i gas {64}. Una tale proliferazione di versioni diverse di una teoria di solito è sintomo di crisi. Nella sua prefazione

Copernico si lamentava anche di questo.

La sempre maggiore indeterminatezza e la sempre minore utilità della teoria del flogisto per la chimica dei gas non furono, però, le uniche cause della crisi che Lavoisier dovette affrontare. Egli era anche molto interessato a spiegare l'aumento di peso che la maggior parte dei corpi presentavano quando venivano bruciati o calcinati; come gli altri, anche questo problema aveva una lunga preistoria. Certamente qualche chimico arabo si era reso conto che alcuni metalli aumentano di peso quando vengono calcinati. Nel XVII secolo parecchi ricercatori avevano, da questo stesso fatto, tratta la conclusione che un metallo calcinato assorbe qualche ingrediente dall'atmosfera. Ma nel XVII secolo alla maggior parte dei chimici una simile conclusione non sembrava indispensabile. Se le reazioni chimiche potevano alterare il volume, il colore, e la struttura dei reagenti, perché non avrebbero potuto alterare anche il peso? Non sempre si considerava il peso come una misura della quantità di materia. Per giunta, l'aumento di peso che si riscontrava quando si arrostita un metallo rimaneva un fenomeno isolato. La maggior parte dei corpi naturali (come per esempio, il legno) perdevano peso quando venivano bruciati, e ciò era in accordo con la teoria del flogisto.

Nel corso del XVIII secolo però, queste risposte al problema dell'aumento di peso, che fino ad allora erano state considerate soddisfacenti, diventarono sempre più difficili da sostenere. In parte perché la bilancia venne usata sempre più di frequente come strumento corrente per la ricerca chimica, in parte perché lo sviluppo della chimica dei gas rese possibile e desiderabile raccogliere e conservare i prodotti gassosi delle reazioni, i chimici scoprirono un numero sempre maggiore di casi in cui la combustione era accompagnata da un aumento di peso. Contemporaneamente, la graduale assimilazione della teoria gravitazionale di Newton condusse i chimici a sostenere che un aumento di peso doveva indicare un aumento della quantità di materia. Tali conclusioni non condussero immediatamente ad abbandonare la teoria del flogisto, poiché questa teoria si prestava ad essere riadattata in vari modi. Forse il flogisto aveva un peso negativo, o forse particelle di fuoco, o qualcos'altro, entravano nel corpo bruciato quando il flogisto lo abbandonava. Oltre a queste v'erano altre spiegazioni. Ma il problema dell'aumento di peso, se non portava all'abbandono della teoria del flogisto, stimolava e

suscitava un numero crescente di studi specifici sull'argomento. Uno di questi studi, *Sul flogisto, considerato come sostanza dotata di peso e [analizzata] in termini di cambiamento di peso che produce nei corpi ai quali si unisce*, fu letto all'Accademia francese all'inizio del 1772, l'anno che si concluse con la consegna da parte di Lavoisier della sua famosa nota sigillata al segretario dell'Accademia. Prima che egli scrivesse quella nota, un problema che era stato per molti anni ai margini della coscienza dei chimici era diventato un rompicapo irrisolto considerato molto importante {65}. Per risolverlo, erano state elaborate parecchie versioni differenti della teoria del flogisto. Come era successo con i problemi suscitati della chimica dei gas, anche quelli prodotti dall'aumento di peso avevano reso sempre più difficile precisare che cosa fosse la teoria del flogisto. Pur continuando ad essere considerato degno di fede e di fiducia come strumento di lavoro, un paradigma della chimica del XVIII secolo perdeva gradualmente la possibilità di avere una formulazione unica. La ricerca guidata da esso assomigliava in misura sempre maggiore a quella condotta sotto l'insegna di scuole opposte nel periodo pre-paradigmatico: questo era un altro effetto tipico della crisi.

Consideriamo ora, come terzo ed ultimo esempio, la crisi che si verificò nella fisica alla fine del XIX secolo e che preparò la via all'emergere della teoria della relatività. Una delle radici di quella crisi può essere fatta risalire alla fine del XVII secolo, quando alcuni filosofi della natura, primo fra tutti Leibniz, sottoposero a critica il fatto che Newton avesse mantenuto, in una versione modernizzata, la concezione classica dello spazio assoluto {66}. Essi riuscirono a dimostrare quasi in tutto, sebbene non completamente, che posizioni assolute e moti assoluti non avevano alcuna funzione nel sistema newtoniano; e furono capaci di lasciare intravedere la considerevole attrazione estetica che una concezione completamente relativistica dello spazio e del moto avrebbe finito più tardi col presentare. Ma la loro critica era di natura puramente logica. Come i primi copernicani che criticavano le prove aristoteliche della stabilità della terra, essi non immaginarono neppure che il passaggio ad un sistema relativistico avrebbe potuto avere conseguenze sul piano delle osservazioni. In nessun momento cercarono di confrontare le loro idee con qualche problema sorto nell'applicazione della teoria newtoniana alla natura. Di conseguenza, le loro idee morirono con loro

all'inizio del XVIII secolo, per essere resuscitate soltanto alla fine del XIX secolo, quando presentarono un rapporto molto diverso con la prassi della fisica.

I problemi tecnici ai quali una filosofia relativistica dello spazio doveva finire col venire collegata cominciarono ad emergere nell'ambito della scienza normale con l'accettazione della teoria ondulatoria della luce poco dopo il 1815; essi non suscitarono tuttavia nessuna crisi fino all'ultimo decennio del secolo scorso. Se la luce è un movimento ondulatorio che si propaga attraverso un etere meccanico governato dalle leggi di Newton, allora sia le osservazioni celesti che gli esperimenti terrestri sono potenzialmente capaci di rivelare uno spostamento attraverso l'etere. Fra le osservazioni celesti, soltanto quelle dell'aberrazione promettevano una accuratezza sufficiente a fornire le informazioni necessarie; la individuazione del movimento rispetto all'etere per mezzo della misurazione dei fenomeni di aberrazione diventò quindi un problema riconosciuto nell'ambito della scienza normale. Numerose apparecchiature speciali furono costruite per risolverlo. Tali apparecchiature, però, non individuarono nessuno spostamento osservabile, ed il problema perciò dagli sperimentatori e dagli osservatori passò ai teorici. Intorno alla metà del secolo, Fresnel, Stokes ed altri immaginarono numerose articolazioni della teoria dell'etere allo scopo di spiegare l'insuccesso incontrato nel tentativo di osservare il movimento. Ognuna di queste articolazioni affermava che un corpo in movimento trascina con sé qualche frazione dell'etere. E ciascuna riusciva con sufficiente successo a spiegare i risultati negativi non solo delle osservazioni celesti ma anche degli esperimenti terrestri, compreso il famoso esperimento di Michelson e di Morley {67}. Non v'era ancora nessun conflitto, fatta eccezione per quello esistente tra le diverse articolazioni. In mancanza di tecniche sperimentali adeguate, tale conflitto non diventò mai acuto.

La situazione cambiò ancora una volta soltanto con la graduale accettazione della teoria elettromagnetica di Maxwell negli ultimi due decenni del xxx secolo. Maxwell stesso era un newtoniano, che credeva che la luce e l'elettromagnetismo in generale fossero dovuti a spostamenti variabili delle particelle di un etere meccanico. Le sue prime versioni di una teoria dell'elettricità e del magnetismo facevano direttamente riferimento a proprietà

ipotetiche che egli attribuiva a questo etere meccanico. Tali proprietà non compaiono più nella versione finale; tuttavia Maxwell continuò a credere che la sua teoria elettromagnetica fosse compatibile con qualche articolazione della concezione meccanica newtoniana {68}. Elaborare l'articolazione adeguata era un compito a cui tanto lui che i suoi successori si sentivano stimolati. In pratica però, come è accaduto ripetutamente nel corso dello sviluppo scientifico, si dimostrò immensamente difficile produrre una articolazione che rispondesse alle richieste del caso. Proprio come la proposta astronomica di Copernico, nonostante l'ottimismo del suo autore, suscitò una crisi crescente per le teorie esistenti sul moto, così la teoria di Maxwell, nonostante la sua origine newtoniana, finì col produrre una crisi per il paradigma dal quale era derivata {69}. Inoltre, il punto attorno al quale questa crisi divenne più acuta fu fornito dai problemi che abbiamo or ora considerati, quelli del movimento rispetto all'etere.

La discussione di Maxwell a proposito del comportamento elettromagnetico dei corpi in movimento non aveva fatto alcun cenno al trascinamento di etere, e si dimostrò veramente difficile introdurre l'ipotesi del trascinamento nella sua teoria. Come conseguenza di tale introduzione, tutta una serie di precedenti osservazioni, che erano state progettate con lo scopo di mettere in evidenza il movimento attraverso l'etere, diventò anomala. Gli anni successivi al 1890 furono perciò testimoni di una serie di tentativi, sia sperimentali che teorici, di mettere in evidenza il movimento rispetto all'etere e per incorporare il trascinamento dell'etere nella teoria di Maxwell. I tentativi sperimentali furono uniformemente accompagnati da insuccesso, sebbene qualche analista pensasse che i suoi risultati erano ambigui. I tentativi teorici elaborarono numerosi punti di partenza promettenti, particolarmente quelli di Lorentz e di Fitzgerald, ma produssero a loro volta altri rompicapo e finirono col generare quella medesima proliferazione di teorie contrastanti che abbiamo precedentemente riconosciuto come un fenomeno che accompagna il manifestarsi di una crisi {70}. È su questo sfondo storico che la teoria della relatività speciale di Einstein emerse nel 1905.

Questi tre esempi sono quasi perfettamente tipici. In ciascun caso una nuova teoria emerse soltanto dopo un clamoroso fallimento dell'attività volta a risolvere problemi nell'ambito della scienza normale. Inoltre, tranne che per il caso di Copernico, per il

quale i fattori esterni alla scienza svolsero un ruolo particolarmente importante, quel fallimento e la proliferazione di teorie che ne è un sintomo si verificarono per un periodo non più lungo di un decennio o due, prima che la nuova teoria venisse enunciata. La nuova teoria si presenta come una risposta diretta alla crisi. Si noti anche, sebbene ciò possa non essere del tutto tipico, che i problemi di fronte ai quali si manifestò il fallimento erano tutti problemi già conosciuti da molto tempo. L'attività precedente della scienza normale aveva fornito tutte le ragioni per considerarli risolti o quasi; ciò aiuta a spiegare perché la sensazione dell'insuccesso, quando venne, poté essere così acuta.

Il fallimento di fronte a problemi di tipo nuovo provoca spesso disappunto, mai sorpresa: né problemi né rompicapo cedono con facilità al primo attacco. Infine, questi esempi presentano un'altra caratteristica comune che può aiutare a mettere in luce l'importante funzione svolta dalla crisi: la soluzione di ciascuno dei problemi in gioco era stata almeno parzialmente anticipata in un periodo in cui non esisteva ancora una crisi nel campo scientifico corrispondente; ed in mancanza della crisi, quelle anticipazioni erano state trascurate.

L'unica anticipazione completa è anche la più famosa: quella di Copernico da parte di Aristarco, nel III secolo a. C. Si è spesso ripetuto che se la scienza greca fosse stata meno deduttiva e meno dominata dai dogmi, l'astronomia eliocentrica avrebbe potuto cominciare a svilupparsi diciotto secoli prima {71}. Ma un'affermazione del genere trascura tutto il contesto storico. Quando Aristarco propose la sua ipotesi il sistema geocentrico, molto più ragionevole, non presentava nessuna difficoltà che potesse venire eliminata da un sistema eliocentrico e una cosa del genere non poteva nemmeno venire in mente. L'intero sviluppo della astronomia tolemaica, dai suoi successi al suo fallimento, si estende per numerosi secoli che hanno seguito la proposta di Aristarco. Del resto, non v'erano ragioni evidenti per prendere Aristarco sul serio. Persino il modellò più elaborato, proposto da Copernico non era né più semplice né più accurata del sistema di Tolomeo. I dati ricavati dalle osservazioni, come vedremo meglio in seguito, non fornivano nessuna base per scegliere una delle due soluzioni. In tali circostanze, uno dei fattori che indusse gli astronomi ad accettare la teoria di Copernico (e che non poté invece agire in favore di Aristarco) fu l'esistenza di una crisi

riconosciuta, la quale aveva svolto una funzione di primo piano nel determinare l'innovazione. L'astronomia tolemaica non era riuscita a risolvere i suoi problemi; era venuto il tempo di offrire ad un competitore l'opportunità di affermarsi. Nel caso degli altri due esempi che abbiamo esaminato, non ci sono state anticipazioni altrettanto complete. Ma certamente una delle ragioni per cui le teorie della combustione per assorbimento dall'atmosfera — teorie sviluppate nel XVII secolo da Rey, Hooke e Mayow — non riuscirono a ricevere un seguito sufficiente fu il fatto che esse non avevano alcun contatto con qualche punto critico riconosciuto che turbasse la prassi scientifica normale {72}. Ed il lungo oblio in cui le critiche relativistiche della teoria newtoniana furono lasciate dagli scienziati del XVIII e XIX secolo fu certamente dovuto in larga misura ad un'analogha incapacità di tali critiche a collegarsi con problemi scottanti.

I filosofi della scienza hanno ripetutamente dimostrato che, ad un insieme di dati, è sempre possibile sovrapporre più di una costruzione teorica. La storia della scienza mostra che, particolarmente nelle prime fasi di sviluppo di un nuovo paradigma, non è neppure molto difficile inventare alternative del genere. Ma tale invenzione di alternative è proprio ciò che gli scienziati raramente tentano, tranne che nello stadio pre-paradigmatico dello sviluppo della loro scienza e in occasioni molto speciali nel corso del suo successivo sviluppo. Fin tanto che gli strumenti forniti dal paradigma continuano a dimostrarsi capaci di risolvere i problemi che questo definisce, la scienza si muove molto velocemente e penetra assai profondamente usando con fiducia, quegli strumenti. La ragione è evidente. Come nel processo di fabbricazione così anche nella scienza il cambiamento di strumenti è una stravaganza che va riservata per l'occasione che lo richiede. Il significato delle crisi sta nell'indicazione, da esse fornita, che l'occasione per cambiare strumenti è arrivata.

Capitolo ottavo.

La risposta alla crisi

Ammettiamo dunque che le crisi siano una condizione preliminare necessaria all'emergere di nuove teorie e chiediamoci ora come gli scienziati reagiscono alla crisi, quando questa è sopravvenuta. Parte della risposta, tanto ovvia quanto importante, può essere scoperta osservando innanzitutto che cosa gli scienziati non fanno mai quando si trovano di fronte anche alle anomalie più gravi e prolungate. Anche se la loro fiducia nel paradigma comincia ad essere scossa ed essi possono prendere in considerazione la ricerca di alternative, non rinunciano però ancora al paradigma che li ha portati alla crisi. Non considerano cioè le anomalie come controfatti, sebbene nel vocabolario della filosofia della scienza esse abbiano questo significato. In parte, tale generalizzazione è semplicemente un'affermazione basata su fatti storici, come quelli esemplificati nelle pagine precedenti e più estesamente, nelle seguenti. Questi danno già una prima idea di ciò che la nostra successiva analisi dell'abbandono dei paradigmi metterà in luce più pienamente: una volta raggiunto lo *status* di paradigma, una teoria scientifica è dichiarata invalida soltanto se esiste un'alternativa disponibile per prenderne il posto. Nessun processo messo in luce finora dallo studio storico dello sviluppo scientifico assomiglia minimamente allo stereotipo metodologico della invalidazione di una teoria mediante un suo confronto diretto con la natura. Questa osservazione non significa che gli scienziati non abbandonino le teorie scientifiche, o che l'esperienza e l'esperimento non siano essenziali quando ciò avviene. Significa soltanto — e si vedrà alla fine che questo è un punto fondamentale — che il giudizio in base al quale gli scienziati decidono di respingere una teoria precedentemente accettata si basa sempre

su qualcosa di più di un semplice confronto di quella teoria col mondo. La decisione di abbandonare un paradigma è sempre al tempo stesso la decisione di accettarne un altro, ed il giudizio che porta a quella decisione implica un confronto sia dei paradigmi con la natura, *sia* di un paradigma con l'altro.

V'è, inoltre, una seconda ragione per dubitare che lo scienziato respinge i paradigmi semplicemente perché si viene a trovare di fronte ad anomalie o a controfatti. Nello sviluppare questo punto, sarà la mia stessa argomentazione che prefigurerà un'altra delle tesi principali di questo saggio. Le ragioni per dubitare indicate sopra erano puramente ragioni di fatto; erano cioè esse stesse controfatti di una teoria epistemologica prevalente. Come tali, se ciò che sto dicendo è corretto, esse possono, nella migliore delle ipotesi, favorire l'insorgere della crisi, o, per essere più precisi, rendere più acuta una crisi che esiste già. Di per se stesse, non possono provare la falsità di quella teoria filosofica, e non lo faranno, poiché i suoi sostenitori reagiranno come abbiamo già visto fare agli scienziati quando si trovano di fronte ad un'anomalia. Essi escogiteranno numerose articolazioni e modificazioni *ad hoc* della loro teoria allo scopo di eliminare ogni conflitto manifesto. Molte delle modificazioni e delle restrizioni necessarie sono, di fatto, già presenti nella letteratura scientifica. Perdo, se questi controfatti epistemologia finiranno per costituire qualcosa di più che una irritazione marginale, ciò avverrà perché essi contribuiscono a fare emergere una nuova e diversa analisi della scienza, all'interno della quale essi cesseranno di essere fonte di turbamento. Inoltre, se possiamo applicare qui lo schema tipico, che osserveremo più tardi nelle rivoluzioni scientifiche, queste anomalie cesseranno anche di avere l'apparenza di semplici fatti. Viste dall'interno di una nuova teoria della conoscenza scientifica, sembreranno piuttosto delle tautologie, ossia delle asserzioni di situazioni che non sarebbe stato possibile concepire diversamente.

È stato più volte osservato, ad esempio, che la seconda legge newtoniana del movimento, sebbene che per essere formulata avesse richiesto secoli di difficile ricerca teorica e sperimentale, per coloro che hanno accettato la teoria di Newton si presenta molto simile ad un'asserzione puramente logica, che non potrebbe essere confutata in nessun modo dai fatti {73}. Nel capitolo X vedremo che la legge chimica delle proporzioni definite e costanti,

che prima di Dalton costituiva una scoperta sperimentale occasionale, dotata di una generalità molto dubbia, dopo le ricerche di Dalton diventò un elemento della definizione di composto chimico che nessuna ricerca sperimentale avrebbe potuto di per se stessa mettere in dubbio. Qualcosa di molto simile si verificherà anche per quanto riguarda la generalizzazione che gli scienziati non riescono ad abbandonare i paradigmi quando si trovano di fronte ad anomalie o a controfatti. Essi non potrebbero far ciò e insieme continuare ad essere scienziati.

Sebbene è improbabile che la storia ne registri i nomi, alcuni sono stati senza dubbio spinti ad abbandonare la scienza a causa della loro incapacità di tollerare una crisi. Come gli artisti, gli scienziati creativi debbono di tanto in tanto essere capaci di vivere in un mondo squinternato: altrove ho descritto «questa necessità come «la tensione indispensabile» implicita nella ricerca scientifica {74}. Ma tale abbandono della scienza a favore di un'altra occupazione è, penso, l'unico genere di abbandono di paradigma cui possano portare i controfatti considerati in se stessi. Una volta che si sia trovato un primo paradigma attraverso il quale considerare la natura, non ha più senso parlare di ricerca indipendente da qualsiasi paradigma. Abbandonare un paradigma senza al tempo stesso sostituirgliene un altro equivale ad abbandonare la scienza stessa. Se uno scienziato sceglie questa via, la sua azione si riflette non sul paradigma ma su lui stesso. Sarà inevitabile che i suoi colleghi lo considerino come «il carpentiere che dà la colpa ai suoi strumenti».

La stessa argomentazione può essere svolta, quasi con eguale efficacia, in senso contrario: non si può parlare di ricerca senza controfatti. Infatti, in che cosa si differenzia la scienza normale dalla scienza in stato di crisi? Non certo per il fatto che la prima non si trova di fronte a controfatti. Al contrario, ciò che abbiamo precedentemente chiamato il rompicapo che costituisce la scienza normale esiste soltanto perché nessun paradigma, che fornisca una base alla ricerca scientifica, riesce mai a risolvere completamente tutti i suoi problemi. I pochi paradigmi che siano parsi far ciò (ad esempio l'ottica geometrica) hanno completamente cessato in breve tempo di produrre problemi di ricerca e sono invece diventati strumenti tecnici. Fatta eccezione per quelli che sono esclusivamente strumentali, tutti i problemi che la scienza normale considera come un rompicapo possono

essere visti, da un altro punto di vista, come un controfatto, e quindi come una possibile ragione di crisi. Copernico considerò come controfatti quelli che la maggior parte degli altri successori di Tolomeo avevano considerato come rompicapo sorti nel confronto fra osservazione e teoria. Lavoisier considerò come un controfatto ciò che Priestley aveva considerato un rompicapo risolto con successo nell'articolazione della teoria del flogisto. Ed Einstein vide un controfatto là dove Lorentz, Fitzgerald ed altri avevano visto rompicapo prodotti dall'articolazione delle teorie di Newton e di Maxwell. Inoltre, neppure l'esistenza di una crisi, di per se stessa, trasforma un rompicapo in un controfatto. Non esiste una netta linea di separazione del genere. Al contrario, la crisi generando in continuità nuove versioni del paradigma, allenta le regole che governano la soluzione di paradigmi all'interno della scienza normale, ed in tal modo permette alla fine l'emergere di un nuovo paradigma. Vi sono, penso, soltanto due alternative: o nessuna teoria scientifica viene mai a trovarsi di fronte a un controfatto, oppure tutte le teorie scientifiche ad ogni momento si imbattono in controfatti.

Come avrebbe potuto sembrare diversa la situazione? Tale domanda ci porta inevitabilmente alla discussione storica e critica della filosofia: ma non possiamo affrontare qui tali argomenti. Possiamo però almeno notare due ragioni per le quali la scienza è parsa fornire un'illustrazione così adeguata della generalizzazione secondo cui la verità e la falsità sono unicamente ed inequivocabilmente determinate dal confronto delle affermazioni coi fatti. La scienza normale si sforza continuamente, e deve farlo, di portare la teoria ed i fatti ad un accordo sempre più stretto, ed una simile attività può facilmente venire considerata come la ricerca di una prova che confermi o invalidi le sue teorie. Viceversa, il suo obiettivo è quello di risolvere un rompicapo, il quale esiste proprio perché si accetta la validità del paradigma. L'insuccesso nel raggiungere una soluzione getta discredito soltanto sullo scienziato e non sulla teoria. Su questo scienziato si potrà fare ancora, e anzi con maggior ragione, il commento che abbiamo già sentito prima: «È un povero carpentiere che dà la colpa ai suoi strumenti». Inoltre, la maniera in cui la pedagogia della scienza intralcia la discussione di una teoria con osservazioni concernenti le sue applicazioni esemplari ha contribuito a rafforzare la teoria della conferma derivata prevalentemente da

altre origini. Colui che legge un testo scientifico può facilmente dato che c'è una minima ragione per fare ciò considerare le applicazioni come una prova della teoria, come le ragioni per le quali si deve credere in essa. Ma gli studenti accettano la teoria sulla base dell'autorità degli insegnanti e dei testi, non a causa della loro evidenza. Quali altre alternative si offrono loro, quale mezzi hanno a disposizione? Le applicazioni presentate nei manuali vi si trovano non come prove, ma perché l'apprendimento di esse è parte dell'apprendimento del paradigma che sta alla base della prassi corrente. Se le applicazioni fossero presentate come prove, allora il completo insuccesso dei manuali nel suggerire interpretazioni alternative o nel discutere i problemi per i quali gli scienziati non sono riusciti a trovare soluzioni conformi al paradigma, porterebbe ad accusare i loro autori di essere estremamente legati ai pregiudizi. Ma non esiste la minima ragione per gettare su di loro una tale accusa.

Per tornare, dunque, alla nostra domanda iniziale: come rispondono gli scienziati alla presa di coscienza di una anomalia del modo in cui la teoria aderisce alla natura? Ciò che si è appena detto mostra che persino una discrepanza più ampia di quella osservata in altre applicazioni della teoria non richiede necessariamente una risposta molto profonda. Vi sono sempre state discrepanze. Anche le più ostinate solitamente finiscono con l'obbedire alla scienza normale. Molto spesso gli scienziati sono disposti ad aspettare, particolarmente se vi sono molti problemi a disposizione in altri settori del campo. Abbiamo già notato, ad esempio, che nel corso del sessantanni successivi all'originale computo di Newton, il movimento del perigeo lunare previsto dal calcolo continuava ad essere soltanto la metà di quello osservato. Dal momento che i migliori fisici matematici d'Europa avevano continuato a lottare senza successo con quella discrepanza ben nota, di tanto in tanto furono avanzate proposte per modificare la legge newtoniana dell'inverso del quadrato. Ma nessuno prese veramente sul serio tali proposte, ed in pratica questa pazienza dimostrata nei confronti di una anomalia di rilievo si dimostrò giustificata. Clairaut, nel 1750, riuscì a dimostrare che soltanto i calcoli adoprati erano sbagliati e che la teoria newtoniana poteva continuare ad essere considerata valida come prima {75}. Persino nei casi in cui sembra impossibile fare anche un solo errore (come quando la matematica impiegata è più semplice o di un tipo meglio

conosciuto e sperimentato con successo in altre occasioni), non sempre una anomalia persistente e riconosciuta produce una crisi. Nessuno mise seriamente in discussione la teoria newtoniana a causa della discrepanza, da lungo tempo riconosciuta, delle previsioni derivanti da quella teoria con la velocità del suono o con il movimento di Mercurio. La prima discrepanza fu risolta alla fine, del tutto inaspettatamente, in seguito ad esperimenti sul calore, fatti con uno scopo del tutto diverso; la seconda svanì con l'apparire della teoria della relatività generale dopo una crisi che essa non aveva minimamente contribuito a creare {76}. A quanto pare nessuna delle due sembrò sufficientemente importante da suscitare il disagio che accompagna la crisi. Esse potevano venire considerate controfatti ed essere messe da parte per una ricerca successiva.

Da tutto ciò risulta che, per suscitare la crisi, una anomalia deve di solito essere qualcosa di più di una anomalia pura e semplice. C'è sempre qualche difficoltà nel contatto fra il paradigma e la natura; la maggior parte di queste difficoltà presto o tardi vengono risolte, spesso mediante processi che non avrebbero potuto essere previsti. Lo scienziato che si sofferma ad esaminare ogni anomalia incontrata raramente riesce a concludere una qualche ricerca significativa. Dovremo allora chiederci che cos'è che rende un'anomalia degna di essere sistematicamente analizzata; ma probabilmente per una domanda di questo genere non esiste una risposta completamente generale. I casi che abbiamo già esaminati sono caratteristici ma scarsamente prescrittivi. Talvolta una anomalia metterà in discussione generalizzazioni esplicite e fondamentali del paradigma, come fece il problema del trascinamento dell'etere per coloro che accettavano la teoria di Maxwell. Oppure, come nel caso della rivoluzione copernicana, una anomalia che non sembra avere un'importanza fondamentale può produrre una crisi, se le applicazioni che essa impedisce hanno un particolare interesse pratico, nel caso specifico per la progettazione di calendari e per la astrologia. Oppure, come nel caso della chimica del XVIII secolo, lo sviluppo della scienza normale può trasformare una anomalia, che fino ad allora aveva costituito soltanto una piccola contrarietà in una causa di crisi: il problema dei rapporti ponderali ebbe uno *status* del tutto differente dopo che si furono sviluppate le tecniche della chimica dei gas. Presumibilmente vi sono molte altre

circostanze che possono rendere un'anomalia particolarmente pressante, e parecchie di queste di solito si combineranno tra loro. Abbiamo già notato, ad esempio, che una delle cause della crisi che dovette affrontare Copernico fu proprio la lunghezza del tempo durante il quale gli astronomi avevano lottato senza successo per ridurre le discrepanze che erano rimaste nel sistema di Tolomeo.

Quando, per queste ragioni ed altre analoghe, una anomalia viene a presentarsi come qualcosa di più che semplicemente un nuovo rompicapo della scienza normale, allora la transizione alla crisi ed alla scienza straordinaria è iniziata. L'anomalia viene ora ad essere riconosciuta come tale da parte della maggior parte degli specialisti. Una sempre maggiore attenzione viene dedicata ad essa da un numero crescente dei più eminenti rappresentanti del campo. Se essa continua a resistere ancora — ciò che di solito non fa — molti di essi possono giungere a considerare la sua soluzione come l'*argomento principale* della loro disciplina. Per essi, il campo non avrà più lo stesso significato che aveva prima. In parte, la differenza deriva semplicemente dal nuovo punto focale dell'indagine scientifica. Una ragione ancor più importante del mutamento risiede nella natura divergente delle numerose soluzioni parziali prodotte dal fatto che sul problema si è concentrata l'attenzione di tutti. I primi attacchi sferrati contro il problema che resiste avranno seguito abbastanza strettamente le regole paradigmatiche. Ma di fronte ad una resistenza continuata, un numero sempre maggiore di attacchi avrà fatto ricorso a qualche articolazione del paradigma di entità scarsa o anche non tanto scarsa, nessuna simile ad un'altra, ciascuna riuscita parzialmente, ma nessuna in modo così ampio da poter venire accettata come paradigma da parte del gruppo. In seguito ad una simile proliferazione di articolazioni divergenti (sempre più spesso esse verranno descritte come adattamenti *ad hoc*) le regole della scienza normale diventano sempre più indistinte. Sebbene esista ancora un paradigma, pochi specialisti si dimostrano interamente d'accordo circa che cosa esso sia. Vengono rimesse in discussione persino le soluzioni precedentemente accettate di problemi considerati risolti.

Quando la situazione diventa acuta, talvolta gli scienziati che vi sono implicati riescono a rendersene conto. Copernico si lamentava che, al suo tempo, gli astronomi erano così «incoerenti

in queste ricerche [astronomiche]... che non riescono neppure a spiegare o ad osservare la lunghezza costante dell'anno stagionale». «Con essi — continuava — è come se un artista dovesse riunire in qualche modo per fare i suoi quadri, le mani, i piedi, la testa, e le altre membra, ricavandole da modelli diversi, ciascuna parte disegnata magistralmente, ma non in rapporto con un unico corpo; e poiché non si accordano in nessun modo le une con le altre, il risultato sarebbe un mostro piuttosto che un uomo» {77}. Einstein, vincolato dall'uso corrente ad uno stile meno fiorito, scrisse soltanto: «Fu come se ci fosse stato strappato via il terreno da sotto i piedi, senza che nessun altro stabile punto d'appoggio su cui poter costruire fosse in vista da qualche parte» {78}. E Wolfgang Pauli, alcuni mesi prima che il lavoro di Heisenberg sulla meccanica matriciale indicasse la via ad una nuova teoria quantistica, scriveva ad un amico: «In questo momento la fisica si trova ancora una volta in una terribile confusione. In ogni caso, è troppo difficile per me, e preferirei essere stato un attore comico o qualcosa del genere e non aver mai sentito parlare di fisica». Questa testimonianza è particolarmente impressionante se confrontata con ciò che Pauli dichiarava meno di cinque mesi più tardi: «Il tipo di meccanica formulato da Heisenberg mi ha ridato speranza e gioia nella vita. Certo, esso non fornisce la soluzione dell'enigma, ma credo che sia ancora possibile fare passi avanti» {79}.

Un riconoscimento così esplicito del fallimento è estremamente raro, ma gli effetti di una crisi non dipendono interamente dal suo riconoscimento cosciente. Quali sono questi effetti? Soltanto due di essi sembrano essere universali. Tutte le crisi cominciano con lo sfocamento del paradigma e col conseguente allentarsi delle regole che governano la ricerca normale. Sotto questo aspetto, la ricerca che si svolge nel periodo delle crisi assomiglia molto alla ricerca del periodo pre-paradigmatico, tranne che, nel primo caso, le differenze si manifestano in un ambito più ristretto e più chiaramente definito. E tutte le crisi si chiudono con l'emergere di un nuovo candidato per il paradigma e con la conseguente battaglia per la sua accettazione. Questi argomenti verranno discussi nei capitoli successivi, ma dobbiamo qui anticipare una parte di ciò che diremo più avanti, allo scopo di completare queste osservazioni sull'evoluzione e sull'anatomia dello stato di crisi.

La transizione da un paradigma in crisi ad uno nuovo, dal quale possa emergere una nuova tradizione di scienza normale, è tutt'altro che un processo cumulativo, che si attui attraverso un'articolazione o un'estensione, del vecchio paradigma. E' piuttosto una ricostruzione del campo su nuove basi, una ricostruzione che modifica alcune delle più elementari generalizzazioni teoriche del campo, così come molti metodi ed applicazioni del paradigma. Durante il periodo di transizione, vi sarà una sovrapposizione abbastanza ampia, ma mai completa, tra i problemi che possono venire risolti col vecchio paradigma e quelli che possono essere risolti col nuovo. Ma vi sarà anche una netta differenza nei rispettivi modi di risolverli. Quando la transizione è compiuta, gli specialisti considereranno in modo diverso il loro campo, e avranno mutato i loro metodi, ed i loro scopi. Uno storico acuto, esaminando un caso classico di riorientamento della scienza dovuto ad un mutamento di paradigma, lo ha descritto recentemente come un «afferrare l'altra estremità del bastone», e cioè come un processo che implica che «si maneggi lo stesso insieme di dati di prima, ma ponendoli in un nuovo sistema di relazioni reciproche e dando quindi loro una diversa struttura» {80}. Altri che hanno notato questo aspetto del progresso scientifico hanno sottolineato la sua somiglianza con un cambiamento nella *Gestalt* visiva: i segni sulla carta che dapprima erano visti come un uccello, sono ora visti come un'antilope, o viceversa {81}. Questo parallelo può essere fuorviante. Gli scienziati non vedono qualcosa *come* qualcos'altro; al contrario, semplicemente lo vedono. Abbiamo già esaminato alcuni dei problemi che sorgono quando si dice che Priestley vide l'ossigeno come aria deflogistizzata. Inoltre, lo scienziato è privo della libertà, che il soggetto della *Gestalt* possiede, di muoversi avanti e indietro tra diversi modi di vedere. Nondimeno, la libertà di movimento della *Gestalt*, particolarmente perché è oggi così familiare, rappresenta un utile prototipo elementare per indicare quello che succede quando un paradigma muta su larga scala.

Le anticipazioni che precedono ci possono aiutare a riconoscere nella crisi una preparazione necessaria all'emergere di nuove teorie, particolarmente dal momento che abbiamo già esaminato una versione su scala ridotta del medesimo processo allorché abbiamo discusso l'emergere delle scoperte. Proprio perché la nascita di una nuova teoria comporta la rottura con una

tradizione di prassi scientifica e introduce una prassi nuova che si svolgerà secondo regole differenti ed entro un differente universo di discorso, è probabile che essa abbia luogo soltanto quando si ha la sensazione che la precedente tradizione sia andata irrimediabilmente fuori strada. Questa osservazione, però, è soltanto un preludio allo studio dello stato della crisi, e, purtroppo, le domande che esso solleva richiedono la competenza dello psicologo ancor più che quella dello storico. Che cosa è la ricerca straordinaria? Come avviene che un'anomalia assume l'aspetto di una legge? Come si comportano gli scienziati quando si rendono conto che v'è qualcosa che fondamentalmente non funziona ad un livello per il quale la loro educazione non ha fornito loro gli strumenti adatti? Questioni come queste richiedono una ricerca molto più vasta, che non deve essere soltanto storica. Ciò che segue sarà necessariamente più provvisorio e meno completo di ciò che precede.

Spesso un nuovo paradigma emerge, almeno in embrione, prima che una crisi si sia sufficientemente sviluppata o sia stata esplicitamente riconosciuta. L'opera di Lavoisier fornisce un esempio che fa al caso nostro. La sua nota sigillata fu depositata presso l'Accademia francese meno di un anno dopo il primo studio completo sui rapporti ponderali nell'ambito della teoria del flogisto e prima che le pubblicazioni di Priestley rivelassero tutta la portata della crisi verificatasi nella chimica dei gas. Analogamente, i primi resoconti della teoria ondulatoria della luce da parte di Thomas Young apparvero in uno stadio molto precoce della crisi che stava maturando nel campo dell'ottica, crisi che sarebbe passata quasi inosservata se nel giro di dieci anni dopo la comunicazione di Young, ma indipendentemente da lui, non fosse sfociata in uno scandalo scientifico internazionale. In casi come questi si può dire soltanto che un insuccesso secondario del paradigma e l'iniziale sfocamento delle regole che esso forniva alla scienza normale furono sufficienti ad indurre qualche scienziato a guardare il suo campo con occhi nuovi. Quello che accadde tra la prima sensazione di turbamento ed il riconoscimento di un'alternativa possibile deve essere stato in gran parte inconscio.

In altri casi, però — per esempio nel caso di Copernico, di Einstein, e della teoria nucleare contemporanea, — tra la prima presa di coscienza del fallimento e l'emergere di un nuovo paradigma trascorse un considerevole periodo di tempo. Quando

succede questo, gli storici possono afferrare almeno una pallida immagine di ciò che è la scienza straordinaria. Di fronte a una anomalia che manifestamente intacca le fondamenta della teoria, i primi sforzi dello scienziato saranno spesso rivolti ad isolarla con maggiore precisione e a darle una struttura. Sebbene egli sia ora cosciente che le regole della scienza normale non possono essere completamente esatte, cercherà di applicarle più rigidamente che mai, per vedere con esattezza, dove e fino a che punto possono continuare a funzionare nell'area in cui si manifestano le difficoltà. Al tempo stesso, cercherà di ingrandire il guasto, di renderlo più rilevante e forse anche più suggestivo di quanto non fosse apparso negli esperimenti fatti quando si pensava di conoscere in anticipo il risultato. Ed in quest'ultimo sforzo più che in ogni altro momento dello sviluppo post-paradigmatico della scienza, lo scienziato apparirà quasi perfettamente corrispondente all'immagine che l'opinione corrente ha di lui. In primo luogo assumerà l'aspetto di colui che cerca a caso, tentando diversi esperimenti per vedere semplicemente che cosa accade, ed andando alla ricerca di un effetto la cui natura egli non può minimamente indovinare. Al tempo stesso, poiché nessun esperimento può essere concepito senza una teoria di qualche genere, lo scienziato in crisi tenterà costantemente di produrre teorie speculative che, se accompagnate da successo, possono aprire la via a un nuovo paradigma, e, se seguite da insuccesso, possono essere abbandonate con relativa facilità.

Il racconto che Keplero ci ha lasciato della sua lotta prolungata col movimento di Marte, e la descrizione che Priestley ci ha dato della sua reazione alla proliferazione di nuovi gas, forniscono esempi classici della ricerca di tipo più casuale prodotta dalla coscienza di una anomalia {82}. Ma probabilmente gli esempi migliori ci sono forniti dalle ricerche contemporanee sulla teoria del campo e sulle particelle fondamentali. In assenza di una crisi che rendesse necessario vedere esattamente fino a quale misura le regole della scienza normale erano ancora utilizzabili, sarebbe stato giustificato l'immenso sforzo richiesto per individuare il neutrino? Oppure, se le regole non avessero indiscutibilmente cessato di funzionare in qualche punto ancora oscuro, sarebbe stato possibile immaginare o verificare l'ipotesi radicale della non-conservazione della parità? Come molte altre ricerche condotte nel campo della fisica negli ultimi dieci anni, questi esperimenti

furono in parte tentativi per localizzare e definire la fonte di un insieme ancora indefinito di anomalie.

Questa ricerca straordinaria spesso, anche se non sempre è accompagnata da un altro genere di ricerca. Mi sembra che sia particolarmente durante i periodi di crisi riconosciuta che gli scienziati si sono rivolti all'analisi filosofica come espediente per risolvere gli enigmi del loro campo. Gli scienziati generalmente non hanno dovuto né voluto essere filosofi. Infatti, la scienza normale di solito tiene la filosofia creativa a debita distanza, e probabilmente per buone ragioni. Nella misura in cui la ricerca normale può essere svolta usando il paradigma come modello, le regole e i presupposti non debbono necessariamente diventare espliciti. Nel capitolo V abbiamo notato che non è necessario neppure che esista un'insieme completo di regole quali sono richieste dall'analisi filosofica. Ma ciò non significa che un esame dei presupposti (anche di quelli inesistenti) non possa rappresentare una maniera efficace di indebolire il dominio della tradizione sulla mente e di suggerire la base di una nuova tradizione. Non è un caso che l'emergere della fisica newtoniana nel XVII secolo e della relatività e della meccanica quantistica nel XX secolo siano stati preceduti e accompagnati da analisi filosofiche fondamentali della tradizione di ricerca contemporanea {83}. Né è un caso che in entrambi questi periodi i cosiddetti esperimenti mentali abbiano svolto un ruolo critico così importante per il progresso della ricerca. Come ho avuto occasione di mostrare altrove, la analitica sperimentazione mentale, che occupa un così largo spazio negli scritti di Galileo, Einstein, Bohr e altri, è perfettamente idonea a mettere il vecchio paradigma a confronto con le conoscenze esistenti, in maniera tale da isolare le radici della crisi con una chiarezza irraggiungibile in laboratorio {84}.

Quando vengono impiegati, singolarmente o insieme questi procedimenti straordinari, può verificarsi un'altra cosa. Concentrando l'attenzione degli scienziati su un'area ristretta di turbamento, e preparandoli a riconoscere le anomalie per quello che sono, la crisi spesso provoca una proliferazione di nuove scoperte. Abbiamo già notato come la presa di coscienza della crisi differenzi l'opera di Lavoisier sull'ossigeno da quella di Priestley; e l'ossigeno non fu l'unico nuovo gas che i chimici coscienti dell'anomalia furono in grado di scoprire nel lavoro di

Priestley. Analogamente, nuove scoperte ottiche si accumularono a ritmo accelerato immediatamente prima e durante l'emergere della teoria ondulatoria della luce. Alcune di esse, come quella della polarizzazione per riflessione, furono il risultato di circostanze accidentali rese possibili da una ricerca concentrata in un'area di difficoltà. (Malus, che fece quella scoperta, era all'inizio del suo lavoro per un saggio sulla doppia rifrazione da presentare per il premio dell'Accademia; era universalmente noto che le conoscenze su tale argomento si trovavano in uno stato insoddisfacente). Altre scoperte, come quella della macchia di luce al centro dell'ombra di un disco circolare, erano previsioni ricavate dalla nuova ipotesi; il successo di quelle previsioni contribuì a trasformare l'ipotesi in un paradigma per la ricerca successiva. E altre scoperte ancora, come quella della colorazione delle fessure e delle lamine sottili, erano effetti che erano già stati visti e talvolta esaminati prima, ma che, come l'ossigeno di Priestley, erano stati assimilati ad effetti noti, in modo che era diventato impossibile comprenderli nel loro vero significato {85}. Considerazioni analoghe potrebbero essere fatte per le molteplici scoperte che, a partire dal 1895 circa, accompagnarono costantemente l'emergere della meccanica quantistica.

La ricerca straordinaria ha probabilmente ancora altre manifestazioni ed altri effetti; ma in questa sfera abbiamo appena cominciato ad intravedere le questioni che si devono porre. Tuttavia, a questo punto non è forse necessario approfondire l'indagine. Le osservazioni che abbiamo già fatto dovrebbero bastare per mostrare come la crisi al tempo stesso allenta gli stereotipi e fornisce i dati supplementari per la fondamentale sostituzione del paradigma. Talvolta la forma del nuovo paradigma è anticipata dalla struttura che la ricerca straordinaria ha dato all'anomalia. Einstein scrisse che, quando era ancora lontano dall'aver trovato una teoria sostitutiva per la meccanica classica, poteva già intravedere l'interrelazione esistente tra le note anomalie della radiazione del corpo nero, dell'effetto fotoelettrico e dei calori specifici {86}. È però più frequente il caso in cui non viene coscientemente intravista in anticipo nessuna struttura del genere. Al contrario, il nuovo paradigma, o un abbozzo di paradigma sufficiente a permettere la successiva articolazione, emerge tutt'a un tratto, talvolta nel buio più completo, nella mente di uno scienziato profondamente immerso nella crisi. Quale sia la

natura dello stadio finale — come avvenga che un individuo inventi (o trovi di avere inventato) un nuovo modo di dare ordine ai dati raccolti ora tutti assieme — rimane per ora inscrutabile e può darsi che lo rimanga per sempre. Possiamo notare soltanto una cosa in proposito: coloro che riescono a fare questa fondamentale invenzione di un nuovo paradigma sono quasi sempre o molto giovani oppure nuovi arrivati nel campo governato dal paradigma che essi modificano {87}. Forse non c'era bisogno di rendere così esplicito questo punto; è ovvio, infatti, che sono quelli gli uomini i quali, proprio perché sono solo scarsamente condizionati alle regole tradizionali della scienza normale da parte della precedente attività, hanno maggiore probabilità di vedere che quelle regole non servono più a definire problemi risolvibili e di concepire un altro insieme di regole che possano sostituirle.

Il conseguente passaggio a un nuovo paradigma costituisce la rivoluzione scientifica, un argomento che finalmente siamo pronti ad affrontare direttamente. Prima tuttavia si consideri un ultimo, e certamente elusivo, aspetto del modo in cui il materiale accumulato negli ultimi tre capitoli ha preparato la via. Fino al capitolo VI, nel quale è stato introdotto per la prima volta il concetto di anomalia, i termini 'rivoluzione' e 'scienza straordinaria' potevano sembrare equivalenti. Cosa ancor più importante: sembrava che i due termini non potessero significare qualcosa di più che 'scienza non-normale', una circolarità che avrà dato fastidio almeno a qualche lettore. Questo però non è giusto. Siamo sul punto di scoprire che una analoga circolarità è propria delle teorie scientifiche. Dia fastidio o no, tale circolarità non è più, comunque, priva di qualificazioni. Questo capitolo e i due precedenti hanno messi in luce numerosi criteri per verificare un insuccesso nell'attività della ricerca normale, criteri che non dipendono affatto dalla possibilità o meno che l'insuccesso sia seguito da una rivoluzione. Messi di fronte a una anomalia o a una crisi, gli scienziati assumono un atteggiamento differente nei confronti dei paradigmi esistenti, e la natura della loro ricerca muta di conseguenza. La proliferazione di articolazioni in concorrenza le une con le altre, il desiderio di tentare qualcosa, l'espressione esplicita di disagio, il ricorso alla filosofia e alla discussione sui fondamenti sono tutti sintomi di un passaggio dalla ricerca normale a quella straordinaria. È dalla loro esistenza, piuttosto che da quella delle rivoluzioni, che dipende il concetto di

scienza normale.

Capitolo nono.

La natura e la necessità delle rivoluzioni scientifiche

Queste osservazioni finalmente ci permettono di esaminare i problemi che danno il titolo al presente saggio. Che cosa sono le rivoluzioni scientifiche, e qual è la loro funzione nello sviluppo scientifico? Gran parte della risposta a tali questioni è stata anticipata nei capitoli precedenti. In particolare, la discussione svolta ha indicato che consideriamo qui rivoluzioni scientifiche quegli episodi di sviluppo non cumulativi, nei quali un vecchio paradigma è sostituito, completamente o in parte, da uno nuovo incompatibile con quello. C'è, però, qualcos'altro da dire; di questo, una parte essenziale può essere introdotta formulando una ulteriore domanda. Perché un mutamento di paradigma dovrebbe essere chiamato rivoluzione? Considerando le vaste ed essenziali differenze esistenti tra lo sviluppo scientifico e quello sociale, quale analogia può giustificare l'uso della medesima metafora secondo cui avvengono rivoluzioni sia nell'uno che nell'altro campo?

Un aspetto dell'analogia dovrebbe già essere evidente. Le rivoluzioni politiche sono introdotte da una sensazione sempre più forte, spesso avvertita solo da un settore della società, che le istituzioni esistenti hanno cessato di costituire una risposta adeguata ai problemi posti da una situazione che esse stesse hanno in parte contribuito a creare. In una maniera più o meno identica, le rivoluzioni scientifiche sono introdotte da una sensazione crescente, anche questa volta avvertita solo da un settore ristretto della comunità scientifica, che un paradigma esistente ha cessato di funzionare adeguatamente nella esplorazione di un aspetto della natura verso il quale quello stesso

paradigma aveva precedentemente spianato la strada. Sia nello sviluppo sociale che in quello scientifico, la sensazione di cattivo funzionamento che può portare a una crisi è un requisito preliminare di ogni rivoluzione. Inoltre, sebbene si debba ammettere che la metafora è un po' forzata, quell'analogia sussiste non solo per quanto concerne i mutamenti più importanti di paradigma, come quelli attribuibili a Copernico e a Lavoisier, ma anche per quanto riguarda i mutamenti molto più esigui legati all'assimilazione di fenomeni di nuovo tipo, come l'ossigeno o i raggi X. Le rivoluzioni scientifiche, come abbiamo notato alla fine del capitolo V, devono sembrare rivoluzionarie soltanto a coloro che usavano i paradigmi che vengono colpiti. Agli estranei possono sembrare, come le rivoluzioni balcaniche dell'inizio del secolo, parti normali di un processo di sviluppo. Gli astronomi, ad esempio, potrebbero accettare i raggi X come una semplice aggiunta a un bagaglio di conoscenze, giacché i loro paradigmi non vengono intaccati dall'esistenza della nuova radiazione. Ma per scienziati come Kelvin, Crookes e Rontgen, i quali nelle loro ricerche si occupavano della teoria delle radiazioni o dei tubi a raggi catodici, la comparsa dei raggi X doveva necessariamente violare un paradigma al tempo stesso che ne creava un altro. Questa è la ragione per la quale questi raggi poterono venire scoperti soltanto attraverso un'anomalia riscontrata nella ricerca normale.

Questo aspetto genetico dell'analogia tra sviluppo sociale e sviluppo scientifico non dovrebbe ormai più suscitare dubbi. L'analogia, però, ha un secondo e più profondo aspetto da cui dipende il significato del primo. Le rivoluzioni politiche mirano a mutare le istituzioni politiche in forme che sono proibite da quelle stesse istituzioni. Il loro successo richiede perciò l'abbandono parziale di un insieme di istituzioni a favore di altre, e nel frattempo la società cessa completamente di essere governata da istituzioni. All'inizio è soltanto una crisi che indebolisce il ruolo delle istituzioni politiche, allo stesso modo che — come abbiamo visto — indebolisce il ruolo dei paradigmi. In numero sempre maggiore gli individui si allontanano sempre più dalla vita politica ufficiale e si comportano in modo sempre più indipendente. Quindi, con l'approfondirsi della crisi, parecchi di questi individui si riuniscono intorno a qualche proposta concreta per la ricostruzione della società in una nuova struttura istituzionale. A

questo punto la società è divisa in campi o partiti avversi, l'uno impegnato nel tentativo di difendere la vecchia struttura istituzionale, gli altri impegnati nel tentativo di istituirne una nuova. E una volta che tale polarizzazione si è verificata, *la lotta puramente politica non serve più*. Siccome differiscono circa la matrice istituzionale all'interno della quale va raggiunto e valutato il cambiamento politico, e siccome non riconoscono nessuna struttura che stia al di sopra delle istituzioni, alla quale possano riferirsi per giudicare della differenza rivoluzionaria, i partiti impegnati in un conflitto rivoluzionario devono alla fine far ricorso alle tecniche della persuasione di massa, che spesso includono la forza. Sebbene le rivoluzioni abbiano avuto un ruolo vitale nello sviluppo delle istituzioni politiche, questo ruolo dipende dal fatto che esse sono eventi in parte extrapolitici o extra istituzionali.

Il resto del presente saggio vuole dimostrare che lo studio storico del mutamento di paradigmi mette in evidenza che caratteristiche simili sono presenti nello sviluppo delle scienze. Analogamente alla scelta fra istituzioni politiche contrastanti, la scelta tra paradigmi contrastanti dimostra di essere una scelta tra forme incompatibili di vita sociale. Poiché ha questo carattere, la scelta non è, e non può essere determinata esclusivamente dai procedimenti di valutazione propri della scienza normale, poiché questi dipendono in parte da un particolare paradigma, e questo paradigma è ciò che viene messo in discussione. Quando i paradigmi entrano, come necessariamente devono entrare in un dibattito sulla scelta di paradigmi, il loro ruolo è necessariamente circolare. Ciascun gruppo usa il proprio paradigma per argomentare in difesa di quel paradigma.

La circolarità che ne risulta, naturalmente, non rende sbagliate o inefficaci le argomentazioni. Colui che premette un paradigma quando discute per difenderlo, può nondimeno fornire un chiaro esempio di quella che sarà la prassi scientifica per coloro che adotteranno il nuovo modo di vedere la natura. Un tale esempio può essere immensamente persuasivo, e spesso convincente. Tuttavia, quale che sia la sua forza, lo *status* dell'argomentazione circolare è soltanto quello della persuasione. Esso non può essere reso logicamente o probabilisticamente convincente per coloro che rifiutano di inserirsi nel circolo. Le premesse e i valori comuni ad entrambi i partiti impegnati nel dibattito sui paradigmi non sono sufficientemente estesi per avere questo effetto. Tanto nelle

rivoluzioni politiche come nella scelta dei paradigmi, non v'è nessun criterio superiore al consenso della popolazione interessata. Per scoprire in che modo vengono effettuate le rivoluzioni scientifiche, dovremo perciò esaminare non solo la corrispondenza con la natura e con la logica, ma anche le tecniche di persuasione che hanno efficacia entro i gruppi abbastanza specifici che costituiscono la comunità scientifica.

Per scoprire perché la questione della scelta di un paradigma non può mai venire risolta inequivocabilmente dalla logica e dall'esperimento da soli, dobbiamo esaminare brevemente la natura delle differenze che dividono i sostenitori di un paradigma tradizionale dai loro successori rivoluzionari. Tale esame è l'oggetto principale di questo e del prossimo capitolo. Abbiamo già visto numerosi esempi di simili differenze, e nessuno dubiterà che la storia ne può fornire molti altri. Ciò che può essere messo in dubbio più facilmente della loro esistenza — e che quindi dobbiamo discutere per prima cosa — è l'affermazione che simili esempi forniscono informazioni essenziali sulla natura della scienza. Ammesso che l'abbandono di un paradigma sia stato un fatto storico, che cosa possiamo imparare da questo fatto oltre ad avere semplicemente osservato la credulità e la confusione umane? Vi sono ragioni intrinseche perché l'assimilazione di un nuovo genere di fenomeni o di una nuova teoria scientifica debba richiedere l'abbandono di un vecchio paradigma?

Si noti innanzitutto che se simili ragioni esistono, esse non derivano dalla struttura logica della conoscenza scientifica. In linea di principio, un fenomeno nuovo può manifestarsi senza avere conseguenze distruttive su nessuna parte della pratica scientifica corrente. Sebbene la scoperta della vita sulla luna avrebbe oggi conseguenze distruttive per alcuni paradigmi esistenti (questi ci dicono, riguardo alla luna, cose che sembrano incompatibili con l'esistenza della vita lassù), la scoperta della vita in qualche parte meno nota della galassia non avrebbe conseguenze di analoga portata. Per la stessa ragione, una nuova teoria non deve necessariamente venire in conflitto con quelle che l'hanno preceduta. Essa può avere a che fare esclusivamente con fenomeni che non erano noti in precedenza, come la teoria quantistica ha a che fare (ma non esclusivamente; e ciò è significativo) con fenomeni subatomici sconosciuti prima del xx secolo. O ancora, la nuova teoria può semplicemente trovarsi a un

livello superiore rispetto alle teorie conosciute in precedenza, a un livello che le permette di collegare un intero gruppo di teorie del livello inferiore senza mutarne sostanzialmente nessuna. Oggi, la teoria della conservazione dell'energia fornisce un collegamento di questo genere tra la dinamica, la chimica, l'elettricità, l'ottica, la teoria del calore, e così via. Possono essere immaginati anche altri tipi di rapporti compatibili tra teorie vecchie e nuove. Di ognuno di essi potrebbero essere trovati degli esempi nel processo storico attraverso cui la scienza si è sviluppata. Se ciò fosse possibile, lo sviluppo scientifico avrebbe una natura genuinamente cumulativa. I fenomeni di tipo nuovo non farebbero che rivelare un ordine nei settori della natura che non erano ancora stati esplorati ed etichettati. Nello sviluppo della scienza, una nuova conoscenza verrebbe a sostituire l'ignoranza piuttosto che una conoscenza già presente, ma di tipo diverso e incompatibile.

Naturalmente la scienza (o qualche altro complesso di attività magari meno efficace) potrebbe essersi sviluppata secondo questo schema, e cioè in modo completamente cumulativo. Molti hanno creduto che ciò corrisponda alla realtà e moltissime persone sembrano ancora convinte che l'accumulazione è quanto meno l'ideale che lo sviluppo storico avrebbe presentato se esso non fosse stato così spesso distorto dall'idiosincrasia umana. Vi sono forti ragioni che spingono ad accettare questa opinione. Nel capitolo X vedremo quali stretti legami connettono l'idea della scienza come accumulazione con una epistemologia dominante, la quale afferma che la conoscenza è una costruzione che la mente innalza direttamente sulla rozza base dei dati sensibili. E nel capitolo IX esamineremo il potente aiuto fornito allo stesso schema storiografico dalle tecniche impiegate da una efficace pedagogia scientifica. Tuttavia, nonostante la straordinaria plausibilità di un simile modello ideale, vi sono ragioni sempre più forti per dubitare che esso possa corrispondere al concetto di *scienza*. Dopo il periodo pre-paradigmatico, l'assimilazione di tutte le nuove teorie e di quasi tutti i fenomeni di nuovo genere ha richiesto di fatto la distruzione di un paradigma esistente e di conseguenza ha provocato un conflitto tra scuole scientifiche avverse. L'acquisizione cumulativa di novità inaspettate risulta essere una eccezione alla regola dello sviluppo scientifico che non si verifica quasi mai. Allora, negli studiosi che prendono sul serio i fatti storici nasce il sospetto che la scienza non tende verso il

modello costruito in base alla nostra immagine della sua natura cumulativa. Forse si tratta di un fenomeno del tutto diverso.

Se però siamo giunti a questa conclusione osservando i fatti che si oppongono a tale immagine, allora una seconda occhiata rivolta al campo che abbiamo esaminato può convincerci che l'acquisizione cumulativa di novità è non solo rara di fatto, ma anche teoricamente improbabile. La ricerca normale, che è cumulativa, deve il proprio successo alla abilità degli scienziati nello scegliere regolarmente problemi che possono venire risolti con tecniche concettuali e strumentali strettamente connesse con quelle che già esistono. (Questa è la ragione per cui una attenzione eccessiva ai problemi utili, senza riguardo per il loro rapporto con le conoscenze e le tecniche esistenti, può così facilmente ostacolare lo sviluppo scientifico). Colui che si sforza di risolvere un problema definito dalla conoscenza e dalle tecniche esistenti non si guarda semplicemente attorno. Egli sa quale risultato vuole raggiungere e in base ad esso sceglie i propri strumenti e orienta i propri pensieri. La novità inaspettata, la nuova scoperta, possono comparire solo nella misura in cui le sue previsioni circa la natura e gli strumenti usati si dimostrano sbagliate. Spesso l'importanza della scoperta che ne deriva sarà essa stessa proporzionale alla portata ed alla ostinatezza dell'anomalia che l'ha annunciata. Ovviamente, vi deve allora essere un conflitto tra il paradigma che mette in luce l'anomalia e quello che più tardi fa rientrare l'anomalia nell'ambito della legge. Gli esempi di scoperte raggiunte in seguito alla distruzione di un paradigma che abbiamo esaminati nel capitolo VI, non ci presentano mere accidentalità storiche. Non c'è nessuna altra maniera efficace per produrre le scoperte.

La stessa argomentazione vale, con evidenza ancora maggiore, per l'invenzione di nuove teorie. Vi sono, in linea di principio, soltanto tre tipi di fenomeni intorno ai quali potrebbe venire sviluppata una nuova teoria. Il primo comprende i fenomeni che sono già stati sufficientemente spiegati dai paradigmi esistenti, e questi raramente offrono l'occasione o il punto di partenza per la costruzione di una nuova teoria.

Quando questo avviene, come nel caso delle tre famose anticipazioni discusse alla fine del capitolo VII, è difficile che le teorie che ne risultano vengano accettate, perché la natura non offre nessun criterio di discriminazione. La seconda classe

comprende quei fenomeni la cui natura è spiegata dai paradigmi esistenti, ma che presentano degli aspetti particolari che possono venire compresi soltanto attraverso una ulteriore articolazione della teoria. Questi sono i fenomeni sui quali gli scienziati dirigono più frequentemente le loro ricerche, ma queste ricerche tendono all'articolazione dei paradigmi esistenti piuttosto che all'invenzione di nuovi. Soltanto quando questi tentativi di articolazione falliscono, gli scienziati si imbattono in un terzo tipo di fenomeni, le anomalie riconosciute, la cui caratteristica principale è l'ostinato rifiuto che oppongono ad ogni tentativo fatto per assimilarle ai paradigmi esistenti. È soltanto questo terzo tipo di fenomeni che dà origine a nuove teorie. Tutti gli altri fenomeni, ad eccezione delle anomalie, sono incasellati ad opera dei paradigmi in un punto della costruzione che la teoria fornisce allo scienziato.

Ma se si fa ricorso a nuove teorie per risolvere le anomalie che sorgono quando una teoria esistente viene messa a confronto con la natura, allora la nuova teoria, quando ha successo, deve permettere in qualche modo delle previsioni, le quali saranno diverse da quelle dedotte dalla teoria che l'ha preceduta. La differenza potrebbe non aver luogo se le due teorie fossero logicamente compatibili. Ma nel processo di assimilazione, la seconda deve sostituire la prima. Persino una teoria come quella della conservazione dell'energia, che oggi sembra una superstruttura logica che ha rapporto con la natura soltanto attraverso altre teorie stabilite indipendentemente, storicamente si sviluppò soltanto attraverso la distruzione di un paradigma. Infatti essa emerse da una crisi di cui un fattore essenziale era rappresentato dalla incompatibilità tra la dinamica newtoniana e alcune conseguenze della teoria del calorico che erano state da poco formulate. Soltanto dopo l'abbandono della teoria del calorico, quella della conservazione dell'energia poté entrare a far parte della scienza (88). E soltanto dopo che aveva fatto parte della scienza per un certo periodo di tempo, essa poté apparire come una teoria di tipo logico superiore, che non era in conflitto con quelle che l'avevano preceduta. È difficile immaginare come delle teorie nuove potrebbero sorgere senza trasformare e distruggere il vecchio modo di vedere la natura. Sebbene l'inclusività logica continui ad essere un possibile modo di interpretare il rapporto tra teorie scientifiche successive, essa non è storicamente plausibile.

Un secolo fa sarebbe stato possibile io penso concludere a questo punto la discussione in favore della necessità di rivoluzioni. Oggi, purtroppo, non possiamo farlo, perché l'argomentazione sviluppata nelle pagine precedenti non può essere sostenuta se viene accettata la interpretazione della natura e della funzione della teoria scientifica che è oggi prevalente. Questa interpretazione, strettamente associata coi primi sviluppi del positivismo logico e non esplicitamente abbandonata dai suoi successori, restringerebbe a tal punto la portata e il significato di una teoria accettata, che essa non avrebbe più la possibilità di entrare in conflitto con nessuna teoria successiva che formulasse previsioni a proposito di qualche fenomeno naturale dello stesso tipo. Il caso più noto e più rilevante a sostegno di questa concezione della teoria scientifica ben delimitata è apparso nel corso delle discussioni sul rapporto tra la moderna dinamica einsteiniana e le vecchie equazioni dinamiche derivanti dai *Principia* di Newton. Dal punto di vista sostenuto in questo saggio, queste due teorie sono fundamentalmente incompatibili, analogamente a quanto abbiamo detto a proposito del rapporto tra astronomia copernicana e tolemaica: la teoria di Einstein può essere accettata soltanto se si riconosce che quella di Newton era sbagliata. Questa continua ad essere oggi l'opinione di una minoranza {89}. Dobbiamo perciò esaminare le obiezioni più importanti che vengono sollevate contro di essa.

L'essenza di queste obiezioni può essere esposta nel modo seguente. La dinamica relativistica non può avere mostrato che la dinamica newtoniana è sbagliata dal momento che questa ultima viene ancora oggi usata con pieno successo dalla maggior parte degli ingegneri e, per applicazioni specifiche, anche da molti fisici. Inoltre, l'uso che viene fatto della teoria più vecchia può essere giustificato proprio sulla base della teoria nuova che l'ha sostituita per certi altri campi di applicazioni. In base alla teoria di Einstein si può dimostrare che le previsioni ricavate dalle equazioni di Newton avranno una precisione altrettanto buona di quella dei nostri strumenti di misura in tutte le applicazioni che soddisfano ad un piccolo numero di condizioni restrittive. Ad esempio, perché la teoria di Newton fornisca una soluzione sufficientemente approssimata, le velocità relative dei corpi presi in considerazione deve essere piccola in rapporto alla velocità della luce. Quando obbedisce a questa e ad altre restrizioni, la teoria newtoniana

appare derivabile da quella einsteiniana, di cui viene perciò a rappresentare un caso speciale.

Ma — continua l'obiezione — una teoria non può mai entrare in conflitto con uno dei suoi casi speciali. Se la scienza einsteiniana sembra invalidare la dinamica newtoniana, ciò è solo perché alcuni newtoniani furono così poco cauti da pretendere che la teoria di Newton producesse risultati assolutamente precisi o che essa fosse valida per velocità relative molto alte. Poiché essi non potevano avere avuto nessuna prova che giustificasse quelle affermazioni, facendole essi venivano a tradire le regole della scienza. La teoria newtoniana, nei limiti in cui è una teoria veramente scientifica sostenuta da prove valide, non ha ancora perduto la sua validità. Soltanto delle affermazioni estranee alla teoria, le quali non fecero mai propriamente parte della scienza, possono essere state dimostrate sbagliate alla luce della teoria di Einstein. Liberata da queste aggiunte ingiustificate prodotte dalla fantasia umana la teoria di Newton non è mai stata messa in dubbio, né lo può essere.

È sufficiente introdurre qualche leggera variante in questa argomentazione per rendere immune da attacchi qualsiasi teoria che sia mai stata usata da un gruppo significativo di scienziati competenti. La tanto criticata teoria del flogisto, ad esempio, rendeva comprensibili numerosi fenomeni fisici e chimici. Essa spiegava perché i corpi bruciavano — essi erano ricchi di flogisto — e perché i metalli avevano tante proprietà in comune in più di quante ne avessero i loro minerali. I metalli erano tutti composti da differenti terre elementari combinate con flogisto, e da quest'ultimo, comune a tutti i metalli, derivavano le proprietà comuni. Inoltre la teoria del flogisto spiegava numerose reazioni nelle quali si ottenevano acidi per combustione di sostanze come il carbone e lo zolfo. E ancora, spiegava la diminuzione di volume che si verificava quando la combustione aveva luogo in un volume di aria chiusa: il flogisto sprigionato dalla combustione «altera» la elasticità dell'aria che lo assorbe, allo stesso modo che il fuoco «altera» la elasticità di una molla di acciaio {90}. Se questi fossero stati gli unici fenomeni che i teorici del flogisto avessero indicato a sostegno della loro teoria, questa avrebbe potuto non essere mai messa in dubbio. Una simile argomentazione potrà essere ripetuta per ogni teoria che sia mai stata applicata con successo a un qualsiasi gruppo di fenomeni.

Ma per salvare le teorie con questo sistema, bisogna limitare la loro sfera di applicazione a quei fenomeni e a quel livello di precisione con cui hanno a che fare le prove sperimentali disponibili {91}. Spinta soltanto un passo più avanti (e una volta fatto un primo passo si può difficilmente evitare di farne un altro), una limitazione del genere impedisce allo scienziato di pretendere di parlare «scientificamente» a proposito di qualsiasi fenomeno che non sia già stato osservato. Persino nella sua forma attuale, la restrizione non permette allo scienziato di fare affidamento sulla teoria ogni volta che le sue ricerche penetrano in un'area nuova o tendono ad un grado di precisione di cui la passata attività svolta in accordo con la teoria non offre un precedente. Queste limitazioni non possono per principio ammettere alcuna eccezione. Ma accettarle significherebbe decretare la fine della ricerca attraverso cui la scienza può svilupparsi ulteriormente.

Ma anche questo punto è ormai diventato una tautologia. Senza il punto di riferimento fornito dal paradigma non potrebbe esservi scienza normale. Inoltre tale punto di riferimento deve valere anche per aree e per gradi di precisione di cui non esiste nessun vero precedente. Altrimenti il paradigma non potrebbe indicare rompicapo che non siano già stati risolti. Oltre a ciò, non è soltanto la scienza normale ad essere condizionata dal paradigma. Se la teoria esistente vincolasse lo scienziato soltanto per quanto riguarda le applicazioni esistenti, non vi potrebbero essere sorprese, anomalie o crisi. Ma sono appunto queste le pietre miliari che indicano la via verso la scienza straordinaria. Se le restrizioni poste dai positivisti all'area di legittima applicabilità di una teoria fossero prese alla lettera, cesserebbe di funzionare il meccanismo che svela alla comunità scientifica quali problemi possono condurre ad un cambiamento fondamentale. Quando ciò si verifica, la comunità ritorna inevitabilmente ad una condizione molto simile a quella pre-paradigmatica, ad una condizione cioè nella quale tutti i membri praticano la scienza, ma in cui il loro prodotto non ha affatto l'aspetto di scienza. C'è proprio tanto da meravigliarsi che il prezzo di un progresso scientifico significativo consiste nel doversi appoggiare ad un punto di riferimento che corre il rischio di essere sbagliato?

Ancor più importante è il fatto che nell'argomentazione positivistica v'è una lacuna logica rivelatrice, la quale ci riporta immediatamente alla natura del mutamento rivoluzionario. È

realmente possibile far *derivare* la dinamica newtoniana dalla dinamica relativistica? Che aspetto presenterebbe una simile derivazione? Immaginiamo una serie di proposizioni $E_1, E_2, \dots E_n$, le quali nel loro insieme costituiscono il *corpus* delle leggi della teoria della relatività. Queste proposizioni contengono variabili e parametri rappresentanti la posizione nello spazio, il tempo, la massa in riposo, ecc. Da esse, mediante le regole di derivazione della logica e della matematica, è deducibile un insieme di proposizioni addizionali, fra le quali alcune che possono venire verificate con l'osservazione. Per dimostrare che la dinamica newtoniana può essere considerata un caso speciale, dobbiamo aggiungere, alle precedenti E_i nuove proposizioni, come $(v/c)^2 \ll 1$, le quali restringano l'ampiezza dei parametri e delle variabili. Questo insieme allargato di proposizioni viene quindi manipolato fino a produrre un nuovo insieme $N_1, N_2, \dots N_m$, che è identico nella forma alle leggi newtoniane del movimento, alla legge di gravità, e così via. A quanto sembra, la dinamica newtoniana è stata derivata da quella einsteiniana, sotto alcune poche condizioni restrittive.

Tuttavia la derivazione è spuria, almeno relativamente a questo punto. Sebbene le N_i siano un caso speciale delle leggi della meccanica relativistica, esse non sono le leggi newtoniane. O perlomeno esse non lo sono fintanto che queste leggi non vengono reinterpretate in una maniera che sarebbe stata impossibile prima di Einstein. Le variabili ed i parametri che nelle E_i della teoria einsteiniana rappresentavano la posizione nello spazio, il tempo, la massa, ecc., sono ancora presenti nelle N_i ; ed esse vi rappresentano ancora lo spazio, il tempo, e la massa einsteiniane. Ma i riferimenti fisici di questi concetti einsteiniani non sono affatto identici a quelli dei concetti newtoniani che hanno lo stesso nome. (La massa newtoniana si conserva immutabile; quella einsteiniana è convertibile con l'energia. Soltanto a basse velocità relative le due masse possono essere misurate nello stesso modo, ed anche allora non devono essere concepite come se fossero la stessa cosa). A meno che cambiamo le definizioni delle variabili presenti nelle N_i , le proposizioni che abbiamo *derivato* da quelle non sono newtoniane. Se le cambiamo, non è corretto dire che abbiamo derivato le leggi di Newton, almeno se accettiamo il senso che oggi generalmente viene dato al termine «derivare». La nostra discussione ha, senza dubbio, spiegato

perché le leggi di Newton sembrano funzionare ancora. Tale spiegazione giustifica — tanto per fare un esempio — un automobilista che si comporta come se visse in un universo newtoniano. Una argomentazione dello stesso tipo viene usata per giustificare l'insegnamento dell'astronomia geocentrica ai periti geometri. Ma l'argomentazione non è ancora riuscita ad ottenere quello che si era prefisso: non è riuscita a dimostrare che le leggi di Newton sono un caso limite di quelle di Einstein. Infatti nel passaggio al limite non è soltanto la forma delle leggi che è mutata. Simultaneamente abbiamo dovuto alterare anche gli elementi strutturali fondamentali di cui si compone l'universo a cui quelle leggi si applicano.

Questa necessità di mutare il significato di concetti tradizionali e familiari costituisce il nucleo dell'effetto rivoluzionario avuto dalla teoria di Einstein. Sebbene più sottile del mutamento dal geocentrismo all'eliocentrismo, o dal flogisto all'ossigeno o dai corpuscoli alle onde, la trasformazione concettuale derivante dalla teoria einsteiniana fu non meno efficace nel distruggere un paradigma precedentemente stabilito. Possiamo addirittura considerare tale trasformazione concettuale come il prototipo dei riorientamenti rivoluzionari che avvengono nelle scienze. Proprio perché non comportò l'introduzione di concetti o di fatti addizionali, il passaggio dalla meccanica newtoniana a quella einsteiniana illustra con particolare chiarezza quell'aspetto fondamentale delle rivoluzioni scientifiche che consiste nella trasformazione della struttura concettuale attraverso la quale gli scienziati guardano al mondo.

Queste osservazioni dovrebbero bastare a dimostrare ciò che, in un altro clima filosofico, avrebbe potuto essere considerato ovvio. Almeno per gli scienziati, la maggior parte delle differenze visibili che distinguono una teoria scientifica caduta in discredito da quella che le succede sono reali. Sebbene una teoria fuori moda possa sempre essere considerata come un caso particolare della teoria più moderna che le è succeduta, per apparire tale deve però essere opportunamente trasformata. È sì tratta di una trasformazione che può essere tentata soltanto con l'aiuto delle conoscenze posteriori, ossia sotto la guida esplicita della teoria più recente. Inoltre, anche se quella trasformazione fosse un espediente al quale si può ricorrere legittimamente per interpretare la vecchia teoria, il risultato della sua applicazione

sarebbe costituito da una teoria così limitata da essere in grado soltanto di riaffermare ciò che era già noto. A causa della sua economicità, una tale riaffermazione avrebbe una qualche utilità, ma non sarebbe sufficiente a guidare la ricerca.

Ammettiamo dunque che le differenze tra paradigmi successivi siano tanto necessarie quanto irrinconciliabili. Possiamo allora dire più esplicitamente che genere di differenze sono? Il tipo di differenza più evidente è già stato descritto più volte. Paradigmi successivi ci dicono cose differenti sugli oggetti che popolano l'universo e sul comportamento di tali oggetti. Differiscono per esempio riguardo a questioni come l'esistenza di particelle subatomiche, la materialità della luce e la conservazione del calore e dell'energia. Queste sono differenze sostanziali esistenti tra paradigmi successivi, che non richiedono ulteriori spiegazioni. Ma i paradigmi differiscono anche in qualcos'altro oltre che negli oggetti, giacché essi sono rivolti, non solo alla natura, ma anche alla scienza precedente che li ha prodotti. Essi determinano i metodi, la gamma dei problemi, e i modelli di soluzione accettati da una comunità scientifica matura di un determinato periodo. Ne consegue che l'accoglimento di un nuovo paradigma spesso richiede una nuova definizione di tutta la scienza corrispondente. Alcuni vecchi problemi possono venire trasferiti ad un'altra scienza o addirittura dichiarati «non scientifici». Altri, che precedentemente erano considerati banali o non erano nemmeno considerati problemi, possono, con un nuovo paradigma, diventare veri e propri archetipi di conquiste scientifiche rilevanti. E col mutare dei problemi, spesso muta anche il criterio che distingue una soluzione realmente scientifica da una mera speculazione metafisica, da un gioco di parole, o da un indovinello matematico. La tradizione della scienza normale che emerge dopo una rivoluzione scientifica è non soltanto incompatibile, ma spesso di fatto incommensurabile con ciò che l'ha preceduta.

L'influenza esercitata dall'opera di Newton sulla tradizione della prassi scientifica «normale» del XVII secolo offre un esempio rimarchevole di questi effetti più sottili che la sostituzione del paradigma comporta. Prima che nascesse Newton, la «nuova scienza» del secolo era finalmente riuscita a sbarazzarsi delle spiegazioni aristoteliche e scolastiche espresse nei termini dell'essenza dei corpi materiali. Dire che una pietra cade perché la sua «natura» la trascina verso il centro dell'universo equivaleva

ormai a una tautologia o a un gioco di parole mentre prima avrebbe avuto un significato. D'ora in poi l'intero flusso delle apparenze sensibili, fra cui il colore, il gusto e persino il peso, doveva venire spiegato in termini di dimensione, forma, posizione e movimento dei corpuscoli elementari di materia primitiva. L'attribuzione di altre qualità agli atomi elementari equivaleva a rivolgersi all'occulto ed andava perciò al di là dei limiti della scienza. Molière colse con precisione il nuovo spirito quando mise in ridicolo il medico che spiegava l'efficacia dell'oppio come soporifero attribuendola ad una potenza dormitiva. Nella seconda metà del XVII secolo, molti scienziati preferivano dire che la forma rotondeggiante delle particelle di oppio le metteva in grado di calmare i nervi intorno ai quali esse si muovevano {92}.

In un periodo precedente le spiegazioni in termini di qualità occulte erano state una parte integrante della ricerca scientifica produttiva. Nondimeno, la nuova spiegazione meccanico-corpuscolare accettata nel XVII secolo si dimostrò immensamente fecondo per molte scienze, sbarazzandole da problemi per i quali non si sarebbero potute trovare soluzioni accettabili e suggerendone altri che li sostituissero. Nella dinamica, per esempio, le tre leggi del movimento di Newton, più che un prodotto di nuovi esperimenti, sono un tentativo di reinterpretare osservazioni note in termini di movimenti e di interazioni di corpuscoli neutri primitivi. Consideriamo un solo esempio concreto. Poiché dei corpuscoli neutri potrebbero agire gli uni sugli altri soltanto per contatto, l'immagine meccanico-corpuscolare della natura diresse l'attenzione degli scienziati verso un soggetto di studio assolutamente nuovo, l'alterazione dei movimenti delle particelle dovuta a collisioni. Descartes impostò il problema e ne dette una prima soluzione provvisoria. Huyghens, Wren, e Wallis gli fecero fare un ulteriore passo avanti, in parte facendo esperimenti di collisione fra pendoli, ma principalmente applicando al nuovo problema proprietà del moto precedentemente note. E Newton incorporò i loro risultati nelle sue leggi del moto. L'«azione» e la «reazione» eguali della terza legge sono i mutamenti delle rispettive quantità di moto che si verificano in due corpi in collisione. Il medesimo mutamento di moto fornisce la definizione di forza dinamica implicita nella seconda legge. In questo, come in molti altri casi del XVII secolo, il paradigma corpuscolare produsse al tempo stesso un nuovo

problema e gran parte della sua soluzione {93}.

Tuttavia, sebbene gran parte delle ricerche di Newton fossero rivolte a problemi e a modelli derivati da una concezione del mondo meccanico-corpuscolare, il paradigma prodotto da quelle sue ricerche comportò un mutamento ulteriore e parzialmente distruttivo dei problemi e dei modelli considerati scientificamente legittimi. La gravità, intesa come una attrazione innata tra ogni coppia di particelle di materia, era una qualità occulta nello stesso senso in cui lo era stata la «tendenza a cadere» degli scolastici. Perciò, finché rimasero in vigore i criteri del corpuscolarismo, la ricerca di una spiegazione meccanica della gravità fu uno dei problemi che impegnarono maggiormente coloro che accettavano i *Principia* come paradigma. Newton dedicò molta attenzione a questo problema, e così pure fecero molti dei suoi successori del XVIII secolo. L'unica scelta che sembrava presentarsi era quella di abbandonare la teoria di Newton a causa della sua incapacità di spiegare la gravità, e una tale alternativa fu adottata da molti. Tuttavia, né l'una né l'altra delle due concezioni finì col trionfare. Incapaci sia di svolgere attività scientifica senza i *Principia*, sia di adattare quest'opera ai criteri corpuscolari del XVII secolo, gli scienziati accettarono gradualmente la concezione che la gravità è innata. Alla metà del XVIII secolo, una tale concezione era ormai accettata quasi universalmente e il risultato fu un genuino ritorno (che non significa regressione) a un modello scolastico. Attrazione e ripulsione innate si aggiunsero alla dimensione, alla forma, alla posizione e al movimento nel costituire le proprietà primarie, fisicamente irriducibili, della materia {94}.

Il mutamento che ne risultò nei criteri e nel campo di problemi delle scienze fisiche ebbe ancora una volta notevoli conseguenze. Verso il 1740, ad esempio, i teorici dell'elettricità potevano parlare della «virtù» attrattiva del fluido elettrico, senza per questo suscitare il ridicolo che aveva coperto il medico di Molière un secolo prima. Quando essi cominciarono a farlo, i fenomeni elettrici presentarono in misura sempre maggiore un ordine diverso da quello che avevano presentato quando erano stati considerati gli effetti di un effluvio meccanico che poteva agire soltanto per contatto. In particolare, quando l'azione elettrica a distanza diventò a pieno diritto un argomento degno di studio, il fenomeno che oggi chiamiamo caricamento per induzione poté essere riconosciuto come uno dei suoi effetti. In precedenza,

quando si era riusciti a vederlo, esso era stato attribuito all'adone diretta di «atmosfere» elettriche o allo spandimento di fluido elettrico inevitabile in ogni laboratorio. La nuova concezione degli effetti induttivi, a sua volta, rese possibile l'analisi che Franklin fece della bottiglia di Leyda e quindi l'emergere di un nuovo paradigma di tipo newtoniano per l'elettricità. Ma la dinamica e l'elettricità non furono gli unici campi scientifici che risentirono le conseguenze della legittimazione della ricerca di forze innate alla materia. Una larga parte della letteratura del XVIII secolo concernente le affinità chimiche e le serie di sostituzione deriva anch'essa da questo aspetto sopra-meccanico del newtonianesimo. I chimici che credevano in queste attrazioni differenziali tra i vari elementi e composti, organizzarono esperimenti mai immaginati prima e si misero alla ricerca, di reazioni di nuovo genere. Senza i dati e i concetti chimici sviluppati in questo processo, la successiva opera di Lavoisier e, in maniera ancora più particolare, quella di Dalton sarebbe stata incomprensibile {95}. Il mutamento dei criteri che governano i problemi, i concetti e le spiegazioni ammissibili può trasformare una scienza. Nel capitolo successivo mostrerò in che senso si può dire che esso può persino trasformare il mondo.

Altri esempi di simili differenze non sostanziali tra paradigmi successivi si possono ricavare dalla storia di qualsiasi scienza in quasi ogni periodo del suo sviluppo. Per il momento accontentiamoci di prenderne in considerazione soltanto altri due molto più brevi. Prima della rivoluzione chimica, uno dei compiti riconosciuti come legittimi per la chimica era quello di spiegare le qualità delle sostanze e i mutamenti che queste qualità subiscono durante le reazioni chimiche. Con l'aiuto di un numero ristretto di «principi» elementari — uno dei quali era il flogisto - il chimico doveva spiegare perché alcune sostanze sono acidi, altre metalli, o combustibili, e così via. Alcuni successi erano stati raggiunti in questa direzione. Abbiamo già osservato che il flogisto spiegava perché i metalli presentavano una così marcata somiglianza fra loro e una analoga spiegazione poteva essere data a proposito degli acidi. La riforma di Lavoisier, che abolì i «principi» chimici, finì col privare la chimica di una effettiva e potente forza esplicatrice. Per compensare una tale perdita, si rese necessario un mutamento di criteri. Per gran parte del XIX secolo, non si richiese a una teoria chimica la capacità di spiegare le qualità dei

composti {96}.

E ancora, Clerk Maxwell condivise con altri sostenitori della teoria ondulatoria della luce del XIX secolo la convinzione che le onde luminose devono propagarsi attraverso un etere materiale. L'elaborazione di un mezzo meccanico capace di costituire il supporto per tali onde fu un problema generalmente riconosciuto da molti fra i suoi più abili contemporanei. La sua teoria, però, ossia la teoria elettromagnetica della luce, non forniva alcun elemento che chiarisse la natura di tale mezzo, e anzi rendeva ancora più difficile di quanto fosse parso prima trovare una soluzione a questo problema. All'inizio, la teoria di Maxwell fu respinta per queste ragioni da gran parte degli studiosi. Ma, come nel caso della teoria di Newton, anche per la teoria di Maxwell si dimostrò difficile farne a meno, e allorché essa raggiunse la condizione di paradigma, l'atteggiamento della comunità scientifica nei suoi riguardi mutò. Nei primi decenni del xx secolo, l'insistenza di Maxwell sulla esistenza di un etere meccanico assunse sempre più l'aspetto di un consenso verbale, ed i tentativi per elaborare tale mezzo eterico vennero abbandonati. Gli scienziati non considerarono più come non scientifico parlare di uno «spostamento» elettrico senza specificare che cosa si spostava. Il risultato fu, ancora una volta, un nuovo insieme di criteri e di problemi, che, nel caso specifico, ebbe molta importanza per l'emergere della teoria della relatività {97}.

Questi caratteristici mutamenti della concezione accettata dalla comunità scientifica riguardo ai suoi problemi e criteri legittimi avrebbe una rilevanza minore per la tesi di questo saggio se si potesse supporre che essi si verificarono sempre da un livello metodologicamente inferiore ad uno superiore. In questo caso i loro effetti sembrerebbero cumulativi. Non c'è da meravigliarsi che alcuni storici hanno sostenuto che la storia della scienza registra un continuo aumento di maturità e di affinamento nella concezione che l'uomo si fa della natura della scienza {98}. Tuttavia la tesi di uno sviluppo cumulativo dei problemi e dei criteri scientifici è ancor più difficile da sostenere della tesi dell'accumulazione di teorie. Il tentativo per spiegare la gravità, sebbene fosse vantaggiosamente abbandonato dalla maggior parte degli scienziati del XVIII secolo, non era diretto ad un problema intrinsecamente illegittimo; le obiezioni sollevate contro le forze innate non erano né intimamente non-scientifiche, né metafisiche

in un senso peggiorativo. Non esiste nessun criterio esterno che permetta un giudizio di questo genere. Ciò che si verificò non fu né un decadimento né un perfezionamento dei criteri, ma semplicemente un mutamento richiesto dall'adozione di un nuovo paradigma. D'altra parte, quel mutamento è stato successivamente rovesciato, e lo potrebbe essere ancora in futuro. Nel xx secolo Einstein riuscì a spiegare le attrazioni gravitazionali, e tale spiegazione ha riportato la scienza verso un insieme di canoni e di problemi che, sotto questo particolare aspetto, assomigliano più a quelli dei predecessori di Newton che a quelli dei suoi successori. E ancora, lo sviluppo della meccanica quantistica ha revocato la proibizione metodologica che ebbe origine nel corso della rivoluzione chimica. I chimici tentano oggi, e con gran successo, di spiegare il colore, lo stato di aggregazione e altre qualità delle sostanze usate e prodotte nei loro laboratori. La stessa cosa sta avvenendo nell'ambito della teoria elettromagnetica. Lo spazio, nella fisica contemporanea, non è il sostrato inerte e omogeneo impiegato sia nella teoria newtoniana che in quella di Maxwell; alcune delle sue nuove proprietà non sono diverse da quelle di un tempo attribuite all'etere; può darsi che un giorno giungeremo a sapere che cos'è uno spostamento elettrico.

Se, dopo aver esaminato le funzioni conoscitive di un paradigma, ci volgiamo a quelle normative, vediamo che gli esempi che precedono ci aiutano a capire meglio il modo in cui i paradigmi influenzano tutta la vita scientifica. In precedenza abbiamo esaminato i paradigmi principalmente per il loro ruolo di veicoli della teoria scientifica. In questo ruolo, la funzione del paradigma è di informare lo scienziato su quali entità la natura contiene o non contiene e su come si comportano quelle entità. Questa informazione fornisce un modello i cui particolari vengono elucidati dalla ricerca scientifica matura. E poiché la natura è troppo complessa e varia per poter essere esplorata a caso, quel modello è essenziale quanto lo sono l'osservazione e la sperimentazione perché la scienza continui a svilupparsi. Attraverso le teorie che incorporano, i paradigmi si dimostrano parte integrante della ricerca scientifica. Essi, però, sono parte integrante della scienza anche sotto altri aspetti, ed è questo il punto che dobbiamo esaminare ora. In particolare, i nostri ultimi esempi mostrano che i paradigmi forniscono agli scienziati non soltanto un modello, ma anche alcune indicazioni indispensabili

per costruirlo. Allorché impara un paradigma, lo scienziato acquisisce teorie, metodi e criteri tutti assieme, di solito in una mescolanza inestricabile. Perciò quando i paradigmi mutano, si verificano di solito importanti cambiamenti nei criteri che determinano la legittimità sia dei problemi che delle soluzioni proposte.

Questa osservazione ci riporta al punto da cui questo capitolo ha preso le mosse, giacché essa ci fornisce una prima esplicita indicazione sulle ragioni per cui la scelta tra paradigmi contrastanti solleva regolarmente questioni che non possono essere risolti coi criteri della scienza normale. Nella misura (che è tanto rilevante quanto incompleta) in cui due scuole scientifiche sono in disaccordo su che cosa considerare come problema e che cosa come soluzione, inevitabilmente esse comunicheranno fra loro per discutere i meriti relativi dei loro rispettivi paradigmi. Nelle argomentazioni parzialmente circolari che ne risultano, ciascun paradigma mostrerà di soddisfare più o meno i criteri che esso stesso si impone e di essere inadeguato rispetto ad alcuni di quelli imposti dal paradigma avversario. Vi sono altre ragioni ancora che spiegano la incompletezza di contatto logico che caratterizza costantemente le discussioni sui paradigmi. Ad esempio, poiché nessun paradigma risolve mai tutti i problemi che esso definisce e poiché non succede mai che due paradigmi lascino irrisolti proprio gli stessi problemi, le discussioni sui paradigmi implicano sempre la questione: Quali problemi è più importante risolvere? Analogamente alla disputa concernente i modelli contrastanti, la questione dei valori può trovare una risposta soltanto in termini di criteri che stanno completamente al di fuori della scienza normale, ed è un tale ricorso a criteri esterni che in maniera più evidente rende rivoluzionari i dibattiti sui paradigmi. Tuttavia, è in gioco anche qualcosa di ancora più fondamentale dei criteri e dei valori. Fin qui ho sostenuto soltanto che i paradigmi sono parte integrante della scienza. Desidero ora indicare un senso in cui essi sono parte integrante anche della natura.

Capitolo decimo.

Le rivoluzioni come mutamenti della concezione del mondo

Esaminando la documentazione della ricerca passata dal punto di vista avvantaggiato della storiografia contemporanea, lo storico della scienza può essere tentato di esclamare che quando mutano i paradigmi, il mondo stesso cambia con essi. Guidati da un nuovo paradigma, gli scienziati adottano nuovi strumenti e guardano in nuove direzioni. Ma il fatto ancora più importante è che, durante le rivoluzioni, gli scienziati vedono cose nuove e diverse anche quando guardano con gli strumenti tradizionali nelle direzioni in cui avevano già guardato prima. è quasi come se la comunità degli specialisti fosse stata improvvisamente trasportata su un altro pianeta dove gli oggetti familiari fossero visti sotto una luce differente e venissero accostati ad oggetti insoliti. Naturalmente, non succede niente di simile. non si tratta di uno spostamento geografico; al di fuori del laboratorio la vita d'ogni giorno continua a scorrere come prima. Tuttavia, dopo un mutamento di paradigma, gli scienziati non possono non vedere in maniera diversa il mondo in cui sono impegnate le loro ricerche. Nei limiti in cui i loro rapporti con quel mondo hanno luogo attraverso ciò che essi vedono e fanno, possiamo dire che, dopo una rivoluzione, gli scienziati reagiscono a un mondo differente.

Le dimostrazioni familiari del riorientamento della *Gestalt* visiva sono molto utili nel fornire un modello elementare di queste trasformazioni del mondo dello scienziato. Quelle che nel mondo dello scienziato prima della rivoluzione erano anatre, appaiono dopo come conigli. Colui che in un primo momento aveva visto la parte esterna di una scatola dall'alto, più tardi ne vede la parte interna dal basso. Trasformazioni di questo genere ma di solito

più graduali e quasi sempre irreversibili, si verificano abitualmente e ripetutamente nel corso dell'educazione scientifica. Guardando una carta topografica con curve di livello, lo studente non vede che linee, mentre il cartografo individua la rappresentazione di un terreno. Guardando la fotografia di una camera a bolle, lo studente vede soltanto linee confuse e interrotte, mentre il fisico vi legge la registrazione di eventi subnucleari a lui familiari. Soltanto quando il suo modo di vedere le cose ha subito trasformazioni di questo genere lo studente entra a far parte del mondo dello scienziato, riesce a vedere le cose che lui vede e a reagire come lui. Il mondo in cui lo studente entra in quel momento, però, non è un mondo stabilito una volta per tutte dalla natura dell'ambiente, da un lato, e dalla natura della scienza, dall'altro. Esso, piuttosto, è determinato unitamente dall'ambiente e dalla particolare tradizione di scienza normale che lo studente ha imparato a seguire. Perciò, in periodi di rivoluzione, quando la tradizione della scienza normale muta, la percezione che lo scienziato ha del suo ambiente deve venire rieducata. In alcune situazioni che gli erano familiari deve imparare a vedere una nuova *Gestalt*. Dopo di che, il mondo della sua ricerca gli sembrerà, in varie parti incommensurabile con quello in cui era vissuto prima. È questa un'altra ragione per cui tra scuole guidate da paradigmi differenti sorgono sempre delle incomprensioni.

Nella loro forma più normale, naturalmente, gli esperimenti della *Gestalt* illustrano soltanto la natura delle trasformazioni della percezione. Essi non ci dicono nulla circa il ruolo dei paradigmi o dell'esperienza precedentemente assimilata nel processo della percezione. Ma su questo punto esiste una ricca letteratura psicologica, gran parte della quale deriva dalle ricerche pionieristiche condotte presso l'Hanover Institute. In uno degli esperimenti, un individuo che inforca occhiali montati con lenti invertenti vede dapprima l'intero mondo capovolto. All'inizio, il suo apparato percettivo funziona come era stato allenato a funzionare senza occhiali, e il risultato è un estremo disorientamento, un'acuta crisi personale. Ma non appena l'individuo ha cominciato ad imparare a trattare col suo nuovo mondo, il suo intero campo visivo fa qualche sobbalzo, solitamente dopo un periodo intermedio in cui la visione è semplicemente confusa. Dopo di che, gli oggetti tornano ad essere visti come lo erano stati prima di inforcare gli occhiali. La

assimilazione di un campo visivo che precedentemente risultava anomalo ha reagito sul campo stesso e lo ha mutato {99}. Sia letteralmente che metaforicamente, l'uomo che si è abituato alle lenti invertenti ha subito una trasformazione rivoluzionaria nella sua visione.

Gli individui sottoposti all'esperimento delle carte da gioco anomale che abbiamo discusso nel capitolo vi fecero un'esperienza di trasformazione abbastanza simile. Fino a che una prolungata esposizione delle carte non insegnò loro che l'universo conteneva carte anomale, essi vedevano soltanto i tipi di carte che dalla loro precedente esperienza erano stati preparati a vedere. Tuttavia, una volta che l'esperienza ebbe fornito loro le necessarie categorie addizionali, essi furono in grado di riconoscere tutte le carte anomale fin dalla prima ispezione fatta per un tempo sufficiente appena a permettere l'identificazione. Altri esperimenti ancora mostrano che la percezione di dimensioni, colore, e così via, di oggetti presentati in condizioni sperimentali varia a seconda dell'addestramento e dell'esperienza precedente dell'individuo sottoposto all'esperimento {100}. Quando si scorre la ricca letteratura sperimentale da cui sono tratti questi esempi, si ha il sospetto che la percezione stessa richiede qualcosa di simile ad un paradigma. Ciò che uno vede dipende sia da ciò a cui guarda, sia anche da ciò che la sua precedente esperienza visivo-concettuale gli ha insegnato a vedere. In mancanza di un simile addestramento non vi può essere — per usare una frase di William James — che «una assordante confusione da far girare la testa».

In questi ultimi anni, numerosi studiosi che si interessano alla storia della scienza hanno trovato straordinariamente interessanti gli esperimenti del tipo di quelli descritti sopra. N. R. Hanson, in particolare, ha fatto uso delle dimostrazioni gestaltiche per elaborare alcune concezioni relative al pensiero scientifico che risultano simili a quelle alle quali sono giunto io qui {101}. Altri colleghi hanno ripetutamente sottolineato che la storia della scienza troverebbe un significato migliore e più coerente se si potesse supporre che di tanto in tanto gli scienziati ebbero l'esperienza di riorientamenti di percezione analoghi a quelli descritti poco fa. Tuttavia, sebbene siano stimolanti, gli esperimenti psicologici non possono essere niente di più nel nostro caso specifico. Essi presentano proprietà caratteristiche della percezione che *potrebbero* occupare una posizione centrale

nello sviluppo scientifico, ma non dimostrano affatto che l'osservazione accurata e controllata condotta dai ricercatori possieda queste proprietà. Per giunta, la natura stessa di questi esperimenti rende impossibile ogni diretta dimostrazione di questo punto. Se l'esemplificazione storica può far sembrare pertinenti questi esperimenti psicologici, dobbiamo innanzitutto fare attenzione al genere di prova che possiamo aspettarci dalla storia.

L'individuo sottoposto ad un esperimento gestaltico sa che la sua percezione ha subito un'oscillazione perché egli è in grado di farla oscillare ripetutamente avanti e indietro finché tiene in mano lo stesso libro o lo stesso pezzo di carta. Cosciente del fatto che nulla è cambiato nell'ambiente che lo circonda, egli dirige la sua attenzione in misura sempre maggiore non alla figura (anatra o coniglio), ma alle linee tracciate sulla carta a cui egli sta guardando. Alla fine può persino imparare a vedere quelle linee senza vedere nessuna delle due figure, e può allora dire (cioè che non avrebbe potuto legittimamente fare prima) che sono le linee quello che vede realmente, ma che le vede alternativamente *come* un'anatra e *come* un coniglio. Analogamente, l'individuo che viene sottoposto all'esperimento con le carte anomale sa (o, per essere più precisi, può lasciarsi persuadere) che la sua percezione ha subito uno spostamento perché un'autorità esterna, lo sperimentatore, lo assicura che, nonostante ciò che *vede*, per tutto il tempo ha *guardato* un cinque nero di cuori. In entrambi i casi, come in tutti gli esperimenti psicologici di questo genere, la efficacia della dimostrazione dipende dalla possibilità che essa offre di farsi analizzare in questo modo. A meno che vi sia un criterio esterno rispetto al quale sia possibile dimostrare uno spostamento della visione, non si può giungere a una conclusione riguardo a possibilità percettive che si alternano.

Per quanto riguarda l'osservazione scientifica, invece, la situazione è esattamente opposta. Lo scienziato non può far ricorso a nulla che sia al di sopra o al di là di ciò che vede coi propri occhi e coi propri strumenti. Se vi fosse una qualche autorità superiore rispetto alla quale si potesse dimostrare che la sua visione ha subito uno spostamento, quella autorità diventerebbe allora essa stessa la fonte dei suoi dati, ed il comportamento della sua vista diventerebbe allora una fonte di problemi (come lo è per lo psicologo il comportamento

dell'individuo soggetto all'esperimento). Lo stesso genere di problemi sorgerebbe se lo scienziato potesse far oscillare da una parte e dall'altra la propria percezione come fa l'individuo soggetto agli esperimenti gestaltici. Il periodo durante il quale la luce era «talvolta un'onda, talvolta una particella», fu un periodo di crisi — un periodo in cui qualcosa non funzionava — ed esso ebbe fine soltanto con lo sviluppo della meccanica ondulatoria e la realizzazione che la luce era un'entità coerente, diversa sia dalle onde che dalle particelle. Se nelle scienze, dunque, degli spostamenti percettivi accompagnano i mutamenti di paradigma, non possiamo aspettarci che gli scienziati siano diretti testimoni di questi mutamenti. Guardando la luna, lo scienziato convertito al copernicanesimo non dice: «Ero solito vedere un pianeta, ma ora vedo un satellite». Una simile locuzione implicherebbe che esiste un senso in cui il sistema tolemaico sia stato esatto una volta. Colui che è stato convertito alla nuova astronomia dirà invece: «Un tempo credevo che la luna fosse (o mi sembrava di vederla come) un pianeta, ma mi sbagliavo». Affermazioni di questo genere sono frequenti nei periodi immediatamente successivi ad una rivoluzione scientifica. Se essa di solito nasconde uno spostamento della visione scientifica o qualche altra trasformazione mentale che abbia lo stesso effetto, non possiamo aspettarci nessuna testimonianza diretta che ci riveli tale spostamento. Dobbiamo piuttosto andare alla ricerca di prove indirette e comportamentistiche del fatto che lo scienziato dotato di un nuovo paradigma vede in maniera diversa da quella in cui aveva visto prima.

Ritorniamo ora ai dati e chiediamoci quale genere di trasformazioni può scoprire nel mondo dello scienziato lo storico che crede in tali mutamenti. La scoperta del pianeta Uranio fatta da Sir William Herschel ci fornisce un primo esempio, che presenta uno stretto parallelismo con l'esperimento fatto con le carte anomale. In almeno diciassette occasioni differenti, tra il 1690 ed il 1781, numerosi astronomi, compresi parecchi fra i più eminenti osservatori d'Europa, avevano visto una stella nelle posizioni che oggi supponiamo siano state occupate a quel tempo dal pianeta Uranio. Uno dei migliori osservatori di questo gruppo aveva effettivamente visto la stella in quattro notti successive nel 1769 senza fare attenzione al movimento che avrebbe potuto suggerirgli una identificazione diversa. Herschel, quando osservò

per la prima volta lo stesso oggetto dodici anni più tardi, impiegò un telescopio molto più perfezionato che aveva costruito egli stesso. Per questa ragione fu in grado di notare una forma discoidale, che era per lo meno insolita per una stella. Qualcosa non funzionava: egli perciò decise di non procedere all'identificazione prima di aver esaminato ulteriormente il fenomeno. L'osservazione mise in luce il movimento di Uranio fra le stelle, ed Herschel perciò annunciò di aver visto una nuova cometa! Soltanto parecchi mesi più tardi, dopo infruttuosi tentativi per ridurre il movimento osservato ad un'orbita di cometa, Lexell suggerì l'idea che l'orbita era probabilmente quella di un pianeta {102}. Quando questo suggerimento fu accettato, il mondo degli astronomi si trovò a contenere molte stelle in meno e un pianeta in più. Un corpo celeste che era stato osservato saltuariamente per quasi un secolo fu visto in modo differente dopo il 1781 perché, come una carta da gioco anomala, non poteva più venire ridotto alle categorie percettive (stelle o comete) fornite dal paradigma che aveva prevalso prima.

La modificazione del modo di vedere che mise in grado gli astronomi di vedere Uranio, il pianeta, non sembra però avere influenzato soltanto la percezione di quell'oggetto già osservato in precedenza. Le sue conseguenze ebbero una portata molto più vasta. Probabilmente, sebbene la prova disponibile non è sicura, quel piccolo mutamento di paradigma imposto da Herschel contribuì a preparare gli astronomi a fare rapidamente la scoperta, avvenuta dopo il 1801, di numerosi pianetini o asteroidi. A causa della loro piccola dimensione, essi non presentavano quell'ingrandimento anomalo che aveva richiamato l'attenzione di Herschel. Nondimeno, gli astronomi, preparati ormai a scoprire ancora dei pianeti, furono capaci, con l'aiuto di strumenti convenzionali, di identificarne venti nei primi cinquant'anni del XIX secolo {103}. La storia dell'astronomia offre molti altri esempi di mutamenti della percezione scientifica indotti da paradigmi, ed alcuni di essi sono ancora più espliciti. Si può considerare casuale il fatto che gli astronomi occidentali videro per la prima volta un mutamento, fino ad allora nei cieli ritenuti immutabili, soltanto nel corso del mezzo secolo che seguì la proposta del nuovo paradigma copernicano. I cinesi, le cui dottrine cosmologiche non erano incompatibili con i mutamenti celesti, avevano registrato l'apparizione di molte stelle nuove nel cielo ad una data molto

anteriore. I cinesi, pur senza l'aiuto del telescopio, avevano anche sistematicamente registrato la comparsa delle macchie solari alcuni secoli prima che esse fossero viste da Galileo e dai suoi contemporanei {104}. D'altra parte, le macchie solari e una nuova stella non furono gli unici esempi di mutamento celeste che si verificarono nei cieli della astronomia occidentale immediatamente dopo Copernico. Usando strumenti tradizionali, alcuni veramente semplici come un pezzo di filo, gli astronomi della fine del XVI secolo scoprirono ripetutamente che le comete vagavano liberamente attraverso lo spazio che precedentemente era stato riservato per le stelle e i pianeti, ritenuti immutabili {105}. La facilità e la rapidità con cui gli astronomi videro cose nuove quando guardarono oggetti vecchi con vecchi strumenti ci può indurre ad affermare che, dopo Copernico, gli astronomi vissero in un mondo differente. In ogni caso, nella loro ricerca essi si comportarono come se le cose stessero proprio così.

Abbiamo tratto gli esempi precedenti dall'astronomia, perché i resoconti delle osservazioni celesti sono spesso presentati usando un vocabolario che consiste di termini di osservazione relativamente puri. Soltanto in resoconti di questo genere possiamo sperare di trovare in un certo senso un parallelismo completo tra le osservazioni degli scienziati e quelle degli individui sottoposti ad esperimenti psicologici. Ma non dobbiamo insistere troppo su un parallelismo così completo, ed abbiamo molto da guadagnare se applichiamo il nostro modello in maniera non troppo rigida. Se ci limitiamo all'uso quotidiano del verbo 'vedere', possiamo subito riconoscere che abbiamo incontrato molti altri esempi di modificazioni della percezione scientifica che accompagnano un mutamento di paradigma. L'uso allargato dei termini 'percezione' e 'vedere' richiederà fra poco una giustificazione esplicita, ma mi si permetta prima di illustrarne le applicazioni nella pratica.

Riconsideriamo per un momento due fra i nostri precedenti esempi tratti dalla storia dell'elettricità. Durante il XVII secolo, allorché la loro ricerca era guidata dall'una o dall'altra teoria dell'effluvio, gli studiosi dell'elettricità avevano ripetutamente veduto che piccole pagliuzze rimbalzavano via o si staccavano da corpi elettrificati che le avevano attratte. Almeno questo è quanto asserivano di vedere gli osservatori del XVII secolo, e non abbiamo alcuna ragione di dubitare dei resoconti della loro

percezione più di quanto possiamo dubitare dei nostri. Posto di fronte alla stessa situazione, un osservatore moderno vedrebbe una repulsione elettrostatica (piuttosto che un rimbalzamento meccanico o gravitazionale), ma storicamente, con una sola eccezione universalmente trascurata, la repulsione elettrostatica non fu vista come tale finché il dispositivo in larga scala di Hauksbee non ne ingrandì notevolmente gli effetti. La repulsione dopo l'elettrificazione per contatto era, però, soltanto uno dei numerosi nuovi effetti di repulsione che Hauksbee vide. Attraverso le sue ricerche, in una maniera piuttosto simile alla riorientazione gestaltica, la repulsione diventò improvvisamente la manifestazione fondamentale dell'elettrificazione, e fu allora l'attrazione che richiedeva una spiegazione {106}. I fenomeni elettrici osservabili all'inizio del XVIII secolo erano più sottili e più vari di quelli visti dagli osservatori del XVII secolo. E ancora, dopo l'assimilazione del paradigma di Franklin, lo studioso di elettricità che si interessava alla bottiglia di Leyda, vi vedeva qualcosa di differente da ciò che aveva visto prima. Il dispositivo era diventato un condensatore, per il quale non erano necessari né la forma di bottiglia né il vetro. Al loro posto acquistarono rilievo i due rivestimenti conduttori, uno dei quali non era neanche presente nel dispositivo originario. Come è attestato da un numero sempre crescente di discussioni scritte e di rappresentazioni figurative, due lamine di metallo separate da un non-conduttore diventarono il prototipo di questa classe di dispositivi {107}. Nello stesso tempo, altri effetti d'induzione furono descritti in modi nuovi e altri ancora furono osservati per la prima volta.

Cambiamenti di questo genere non si riscontrano soltanto nella storia dell'astronomia e dell'elettricità. Abbiamo già sottolineato alcune trasformazioni analoghe del modo di vedere che si possono ricavare dalla storia della chimica. Lavoisier, come abbiamo detto, vide l'ossigeno là dove Priestley aveva visto l'aria deflogistizzata e dove altri osservatori non avevano visto assolutamente nulla. Per imparare a vedere l'ossigeno, però, Lavoisier dovette modificare anche la propria concezione di molte altre sostanze più familiari. Ad esempio, egli dovette vedere un minerale composto là dove Priestley ed i suoi contemporanei avevano visto una terra elementare, ed oltre a questo vi furono altri cambiamenti del genere. In conseguenza della scoperta dell'ossigeno, Lavoisier riuscì come minimo a vedere la natura in

modo differente. E se non vogliamo in qualche modo far ricorso a quella ipotetica natura immutabile che egli «vide in modo differente», il principio di economia d costringerà ad affermare che, dopo la scoperta dell'ossigeno, Lavoisier operò in un mondo differente.

Vedremo fra breve se sia possibile evitare un modo di parlare così strano; prima però dobbiamo esaminare ancora un esempio in cui si continuerà ad usare quel linguaggio, tratto da una delle parti più note dell'opera di Galileo. Fin dalla remota antichità molti avevano visto che un qualunque corpo pesante, appeso a una corda o a una catena, oscilla avanti e indietro fino a raggiungere alla fine uno stato di quiete. Per gli aristotelici, che credevano che un corpo pesante si muovesse per sua natura da una posizione più elevata verso uno stato di riposo naturale in una posizione più bassa, un corpo oscillante era semplicemente un corpo che cadeva con difficoltà. Vincolato dalla catena, esso poteva raggiungere lo stato di riposo nel suo punto più basso soltanto dopo un movimento tortuoso e un periodo di tempo considerevole. Galileo invece, quando guardò un corpo oscillante, vide un pendolo, ossia un corpo che quasi riusciva a ripetere lo stesso movimento più e più volte all'infinito. Dopo aver osservato attentamente il fenomeno, Galileo notò anche molte altre proprietà del pendolo e sulla loro base costruì alcune delle parti più importanti ed originali della sua nuova dinamica. Dalle proprietà del pendolo per esempio Galileo derivò le sue argomentazioni veramente complete e solide a sostegno della reciproca indipendenza tra peso e velocità di caduta, come pure quelle per determinare il rapporto tra l'altezza verticale e la velocità terminale dei moti lungo un piano inclinato {108}. Egli vide tutti questi fenomeni naturali in maniera diversa da come essi erano stati visti prima.

Come potè verificarsi una tale trasformazione nel modo di vedere? Essa fu resa possibile, naturalmente, dal genio individuale di Galileo. Ma si noti che qui il genio non si manifesta in un'osservazione più accurata o più obiettiva del corpo oscillante. Dal punto di vista descrittivo, la percezione aristotelica è non meno accurata. Quando Galileo notò che il periodo del pendolo era indipendente dall'ampiezza per ampiezze di 90° , la sua concezione del pendolo lo portò a vedere in tale fenomeno una regolarità molto maggiore di quella che vi possiamo scoprire oggi {109}. Piuttosto, si può pensare che la genialità di Galileo consiste

nell'utilizzazione che egli fece delle possibilità percettive rese disponibili da un mutamento di paradigma avvenuto nel Medioevo. Galileo non aveva avuto un'educazione esclusivamente aristotelica. Al contrario, gli era stato insegnato ad analizzare i movimenti nei termini della teoria dell'*impetus*, un paradigma tardo medievale che sosteneva che il movimento continuo di un corpo pesante era dovuto ad una forza interna impressa in esso dall'agente che, lanciandolo, lo aveva messo in movimento. Giovanni Buridano e Nicola di Oresme, gli scolastici del XIV secolo che dettero la formulazione più rigorosa della teoria dell'impeto, furono i primi, per quanto è noto, ad aver visto nei movimenti oscillatori una parte di ciò che vi vide Galileo. Buridano descrive il movimento di una corda vibrante come un tipo di movimento in cui l'impeto viene impresso nel momento in cui la corda è pizzicata; l'impeto viene poi utilizzato per spostare la corda contro la resistenza della sua tensione; successivamente la tensione trascina indietro la corda, imprimendovi un impeto crescente fino a che viene raggiunto il punto di mezzo del movimento; dopo di che l'impeto sposta la corda nella direzione opposta, ancora contro la sua tensione, e così via in un processo simmetrico che può continuare indefinitamente. Più tardi Oresme abbozzò una analisi dello stesso tipo a proposito di una pietra oscillante, realizzando quella che oggi si presenta come la prima discussione del pendolo {110}. Il suo punto di vista è certamente molto simile a quello con cui Galileo affrontò per la prima volta la questione del pendolo. Almeno nel caso di Oresme, e quasi certamente anche in quello di Galileo, si trattava di una concezione resa possibile dal passaggio dall'originale paradigma aristotelico del moto a quello scolastico della teoria dell'*impetus*. Fino a che non fu inventato il paradigma scolastico, lo scienziato non poteva vedere pendoli, ma soltanto pietre oscillanti. I pendoli poterono esistere soltanto quando si fu verificato qualcosa di molto simile a un riorientamento gestaltico indotto dal paradigma.

Ma è proprio necessario descrivere come trasformazione del modo di vedere ciò che separa Galileo da Aristotele, o Lavoisier da Priestley? *Videro* costoro realmente cose differenti quando *guardarono* oggetti dello stesso genere? V'è un senso legittimo in cui possiamo dire che essi perseguirono le loro ricerche in mondi differenti? Non possiamo più rinviare a più tardi queste domande, giacché c'è evidentemente un altro modo, molto più comune, di

descrivere tutti gli esempi storici che abbiamo illustrato sopra. Molti lettori saranno certamente tentati di dire che ciò che muta con un paradigma è soltanto il modo in cui lo scienziato interpreta le osservazioni che, per se stesse, sono determinate una volta per tutte dalla natura dell'ambiente e dell'apparato percettivo. Secondo una tale concezione, Priestley e Lavoisier videro tutt'e due ossigeno, ma interpretarono le loro osservazioni in modo differente; Aristotele e Galileo videro tutt'e due pendoli, ma differirono nell'interpretazione di ciò che entrambi avevano visto.

Diciamo subito che questa concezione, molto diffusa, a proposito di ciò che si verifica quando gli scienziati cambiano idea su problemi fondamentali, non può essere né completamente sbagliata né un errore puro e semplice. Piuttosto essa è parte essenziale di un paradigma filosofico avanzato da Descartes e sviluppato contemporaneamente alla dinamica newtoniana. Questo paradigma ha presentato i suoi utili servizi sia alla scienza che alla filosofia. La sua utilizzazione, come è avvenuto per la dinamica, ha reso possibile una comprensione fondamentale che forse non si sarebbe potuta raggiungere in un altro modo. Ma come è mostrato anche dall'esempio della dinamica newtoniana, persino il successo più straordinario conseguito nel passato non fornisce una garanzia che ci assicuri la possibilità di rimandare indefinitamente la crisi. Le ricerche attuali in alcuni settori della filosofia, della psicologia, della linguistica e persino della storia dell'arte spingono tutte verso la conclusione secondo cui il paradigma tradizionale, per qualche ragione non funziona più. La sua inadeguatezza è resa ancor più evidente dallo studio storico della scienza, che è in questo saggio al centro della nostra attenzione.

Nessuna di queste discipline che spingono verso la crisi ha ancora prodotto una alternativa soddisfacente al paradigma epistemologico tradizionale; tuttavia, esse cominciano a suggerire alcune delle caratteristiche che dovrà avere il nuovo paradigma. Io per esempio, sono perfettamente cosciente delle difficoltà che si creano quando si dice che Aristotele e Galileo, guardando pietre oscillanti, videro, il primo una caduta vincolata, il secondo un pendolo. Le medesime difficoltà sono sollevate, in una forma ancor più fondamentale, dall'affermazione che apre questo capitolo: che sebbene il mondo non cambi per un mutamento di paradigma, lo scienziato si trova poi a lavorare in un mondo

differente. Tuttavia sono convinto che dobbiamo imparare a dare un senso ad affermazioni che sono perlomeno simili a questa. Ciò che avviene durante una rivoluzione scientifica non è completamente riducibile a una reinterpretazione di dati particolari e stabiliti una volta per tutte. In primo luogo, i dati non sono stabiliti inequivocabilmente. Un pendolo non è una pietra che cade, né l'ossigeno è aria deflogistizzata. Di conseguenza, i dati che lo scienziato raccoglie da questi oggetti diversi sono essi stessi differenti, come vedremo fra breve. Cosa ancor più importante, il processo in virtù del quale l'individuo o la comunità realizzano il passaggio dalla caduta vincolata al pendolo o dall'aria deflogistizzata all'ossigeno, non è un processo corrispondente a un'interpretazione. Come lo potrebbe essere in mancanza di dati fissi da interpretare? Lo scienziato che abbraccia un nuovo paradigma assomiglia, più che ad un interprete, a colui che inforca occhiali con lenti invertenti. Sebbene abbia di fronte a sé lo stesso insieme di oggetti di prima e sia cosciente di ciò, egli li trova nondimeno completamente trasformati in parecchi dettagli.

Nessuna di queste osservazioni vuole negare che gli scienziati interpretino in maniera caratteristica osservazioni e dati. Al contrario, Galileo interpretava osservazioni concernenti il pendolo, Aristotele osservazioni relative a pietre cadenti, Musschenbroek osservazioni fatte su una bottiglia piena di cariche, e Franklin osservazioni fatte su un condensatore. Ma ciascuna di queste interpretazioni presupponeva un paradigma. Esse facevano parte della scienza normale, ossia di un'attività che, come abbiamo già visto, mira a raffinare, estendere e articolare un paradigma che già esiste. Il capitolo III d ha fornito numerosi esempi in cui l'interpretazione svolgeva un ruolo centrale. Quegli esempi presentano le caratteristiche che sono comuni alla stragrande maggioranza delle ricerche. In ciascuno di essi lo scienziato, in virtù del paradigma che aveva accettato, sapeva che cos'era un dato, quali strumenti si potevano usare per afferrarlo e quali erano i concetti utilizzabili per la sua interpretazione. Dato un paradigma, l'interpretazione dei dati costituisce l'attività fondamentale del lavoro di indagine che si sviluppa intorno ad esso.

Ma questa attività di interpretazione — lo abbiamo ripetuto tante volte nei paragrafi precedenti — può soltanto articolare un paradigma, non correggerlo. I paradigmi non si lasciano

minimamente correggere dalla scienza normale. La scienza normale al contrario, come abbiamo già visto, porta in definitiva soltanto al riconoscimento di anomalie e di crisi. E queste vengono risolte non in virtù di una riflessione o di un'interpretazione, ma in virtù di un evento relativamente improvviso e imprevisto, analogamente a ciò che avviene nel riorientamento gestaltico. Gli scienziati perciò parlano spesso di «un velo che casca dagli occhi» o di «un lampo» che «illumina» un rompicapo precedentemente oscuro, mostrando così i suoi elementi sotto una luce nuova che per la prima volta permette di giungere alla soluzione. In altre occasioni, la illuminazione necessaria avviene nel subconscio {111}. Nessun senso comune del termine 'interpretazione' corrisponde a questi lampi d'intuizione attraverso cui nasce un nuovo paradigma. Sebbene tali intuizioni dipendano dall'esperienza, sia anomala che congruente, acquisita col vecchio paradigma, esse non presentano alcun legame logico o materiale con nessun particolare elemento di quella esperienza, alla quale invece un'interpretazione sarebbe inevitabilmente legata. Esse invece raccolgono larghe porzioni di quell'esperienza e le trasformano nel fascio di esperienze piuttosto diverso che verrà poi collegato pezzo per pezzo col nuovo paradigma, ma non col vecchio.

Per avere un'idea più precisa di che cosa possano essere queste differenze di esperienza, ritorniamo per un momento ad Aristotele, a Galileo e al pendolo. Quali dati poté raccogliere ciascuno di loro come risultato dell'interazione tra i loro differenti paradigmi e il loro comune ambiente? Vedendo una caduta vincolata, Aristotele avrebbe misurato (o perlomeno discusso: Aristotele raramente misurava) il peso della pietra, l'altezza verticale alla quale era stata sollevata e il tempo che essa impiegava a raggiungere uno stato di riposo. Insieme alla resistenza del mezzo, erano queste le categorie concettuali impiegate dalla scienza aristotelica quando trattava della caduta dei corpi {112}. Una ricerca normale guidata da simili categorie non avrebbe potuto produrre le leggi scoperte da Galileo. Essa avrebbe potuto soltanto condurre — e per un'altra via condusse — a una serie di crisi da cui poteva emergere la concezione galileiana della pietra oscillante. In conseguenza di tali crisi e di altri mutamenti intellettuali, Galileo vide la pietra oscillante in maniera del tutto differente. L'opera di Archimede sui corpi galleggianti

fece considerare il mezzo non essenziale; la teoria dell'impeto rese il movimento simmetrico e permanente; il neoplatonismo diresse l'attenzione di Galileo sulla forma circolare del movimento {113}. Egli pertanto misurò soltanto il peso, il raggio, lo spostamento angolare ed il periodo di oscillazione, che erano appunto i dati che potevano venire interpretati per produrre le leggi galileiane del pendolo. Nel caso specifico, un'interpretazione si dimostrò quasi superflua. Dati i paradigmi di Galileo, era molto facile mettere in evidenza, mediante l'indagine, le regolarità pendolari. In che altro modo dobbiamo spiegare la scoperta fatta da Galileo che il periodo del pendolo è assolutamente indipendente dalla sua ampiezza, una scoperta che la scienza normale derivante da Galileo dovette estirpare e che oggi siamo del tutto incapaci di documentare. Regolarità che non avrebbero potuto esistere per un aristotelico (e che, di fatto, non trovavano nessuna precisa esemplificazione in nessun aspetto della natura) erano conseguenze dell'esperienza immediata per colui che vedeva la pietra oscillare come la vedeva Galileo.

Forse questo esempio è troppo fantasioso, poiché gli aristotelici non ci hanno lasciato nessuna documentazione di discussioni sulle pietre oscillanti. Considerato alla luce del loro paradigma, si trattava di un fenomeno straordinariamente complesso. Ma gli aristotelici discussero il caso più semplice, quello delle pietre che cadono senza vincoli insoliti; e in tali discussioni si possono mettere in evidenza le stesse differenze di visione. Guardando cadere una pietra, Aristotele vi vedeva un mutamento di stato piuttosto che un processo. Per lui, le misure che caratterizzavano un movimento erano perciò la distanza totale coperta e il tempo totale trascorso, parametri che permettevano di ottenere ciò che oggi chiameremmo non velocità, ma velocità media {114}. Analogamente, poiché la pietra veniva spinta dalla sua natura a raggiungere la sua posizione di riposo finale, Aristotele considerava come parametro della distanza, in ogni istante del movimento, la distanza rispetto *al punto finale* piuttosto che quella *dal punto di partenza* del moto {115}. Questi parametri concettuali stanno alla base e chiariscono il significato delle sue ben note «leggi del movimento». La critica scolastica però, in parte attraverso il paradigma dell'impeto, in parte attraverso una dottrina nota col nome di latitudine delle forme, mutò questo modo di concepire il movimento. Una pietra mossa dall'impeto,

acquista sempre più impeto quanto più si allontana dal suo punto di partenza; la distanza misurata a partire da un punto, piuttosto che quella per giungere ad un punto, diventò pertanto il parametro che interessava. Oltre a ciò, la nozione aristotelica di velocità venne sdoppiata dagli scolastici nei due concetti che, subito dopo Galileo, diventarono i nostri concetti di velocità media e di velocità istantanea. Ma, quando venne osservata dal punto di vista del paradigma del quale facevano parte queste concezioni, una pietra in caduta libera manifestò, come il pendolo, le leggi che la governavano già quasi fin dalla prima occhiata. Galileo non fu uno dei primi ad affermare che le pietre cadono con moto uniformemente accelerato [116]. Inoltre, egli aveva costruito il suo teorema sull'argomento e ricavato molte delle sue conseguenze prima di fare gli esperimenti col piano inclinato. Quel teorema era un altro modello per descrivere le regolarità divenute accessibili al genio in un mondo determinato congiuntamente dalla natura e dai paradigmi sulla cui base Galileo ed i suoi contemporanei erano stati educati. Vivendo in quel mondo, Galileo poteva ancora spiegare quando lo voleva perché Aristotele aveva visto ciò che aveva visto. Nondimeno, il contenuto immediato dell'esperimento di Galileo coi corpi in caduta libera non era identico a quello di Aristotele.

Naturalmente non è affatto evidente che noi dobbiamo preoccuparci così tanto dell'«esperienza immediata», cioè delle caratteristiche percettive che un paradigma mette in così piena luce da rivelarne le regolarità quasi alla prima occhiata. Quelle caratteristiche debbono evidentemente mutare col mutare dei presupposti che vincolano uno scienziato ai paradigmi, ma sono ben diverse da quelle che di solito abbiamo in mente quando parliamo di dati grezzi o dell'esperienza bruta dalla quale si ritiene che la ricerca scientifica derivi. Forse l'esperienza immediata dovrebbe essere messa da parte come qualcosa di fluido e di impreciso, e dovremmo invece discutere le operazioni e le misurazioni concrete che lo scienziato esegue in laboratorio. O forse l'analisi dovrebbe essere spinta a un punto più avanzato di quello rappresentato dal dato immediato. Ad esempio, potrebbe essere condotta nei termini di qualche linguaggio descrittivo neutrale, forse di un linguaggio costruito in modo tale da corrispondere alle impressioni retiniche che mediano ciò che lo scienziato vede. Soltanto ricorrendo ad uno di questi mezzi

possiamo sperare di recuperare un regno in cui l'esperienza è di nuovo stabile una volta per tutte — in cui il pendolo e la caduta vincolata non sono percezioni differenti, ma piuttosto interpretazioni differenti dei dati inequivoci forniti dall'osservazione di una pietra oscillante.

Ma l'esperienza sensibile è davvero immutabile e neutra? Le teorie sono davvero semplicemente interpretazioni umane di dati inequivocabili? Il punto di vista epistemologico che ha dominato nella filosofia occidentale per tre secoli impone un immediato e deciso: Sì! In mancanza di una alternativa evidente, trovo impossibile abbandonare interamente un simile punto di vista. Tuttavia esso non funziona più con efficacia e i tentativi per farlo funzionare attraverso l'introduzione di un linguaggio descrittivo neutrale mi sembrano oggi disperati.

Le operazioni e le misurazioni che uno scienziato esegue in laboratorio non sono «il dato» dell'esperienza, ma piuttosto «ciò che viene rilevato con difficoltà». Non sono ciò che lo scienziato vede, o perlomeno non lo sono fino a che la sua ricerca non è sufficientemente avanzata e la sua attenzione non è concentrata su un preciso argomento. Piuttosto esse sono indicazioni concrete del contenuto di percezioni più elementari, e come tali vengono scelte dalla scienza normale per essere esaminate in profondità soltanto perché si spera di poterle utilizzare per sviluppare ulteriormente un paradigma tradizionale. Le operazioni e le misurazioni sono determinate dal paradigma in maniera ancor più evidente di quanto lo sia l'esperienza immediata dalla quale in parte derivano. La scienza non si occupa di tutte le possibili manipolazioni di laboratorio; essa sceglie invece quelle che possono servire a far corrispondere un paradigma all'esperienza immediata che in parte è stata determinata da quello stesso paradigma. Di conseguenza, scienziati con paradigmi differenti si interessano di differenti manipolazioni concrete di laboratorio. Le misurazioni che si debbono eseguire per studiare il pendolo non sono le stesse di quelle necessarie per studiare la caduta vincolata. E analogamente, le operazioni adatte a chiarire le proprietà dell'ossigeno non sono sempre identiche a quelle che si richiedono quando si studiano le caratteristiche dell'aria deflogistizzata.

Quanto ad un linguaggio puramente descrittivo, forse ne verrà creato uno. Ma tre secoli dopo Descartes, la nostra speranza in

una simile eventualità dipende ancora esclusivamente da una teoria della percezione e della mente. E la moderna sperimentazione psicologica produce rapidamente in gran quantità fenomeni con cui quella teoria non può andare d'accordo. L'esempio dell'anatra-coniglio mostra che due uomini con identiche impressioni retiniche possono vedere cose differenti; le lenti invertenti mostrano che due uomini con impressioni retiniche differenti possono vedere la stessa cosa. La psicologia fornisce in gran quantità esempi che dimostrano questi fatti, e i dubbi che ne derivano diventano anche più forti quando si considera la storia dei tentativi fatti per costruire un effettivo linguaggio d'osservazione. Nessun tentativo fatto fin'ora per raggiungere questo scopo è riuscito anche soltanto ad avvicinarsi a un linguaggio di pure percezioni che sia applicabile in tutti i casi. E quei tentativi che più vi si avvicinano, presentano una caratteristica che rafforza notevolmente parecchie delle tesi principali di questo saggio. Essi presuppongono fin dall'inizio un paradigma, ricavato o da una teoria scientifica corrente o da qualche sezione del linguaggio comune, dal quale si cercano di eliminare tutti i termini non-logici e non-percettivi. Per ora soltanto in pochi campi questo tentativo è stato spinto molto avanti e ha ottenuto risultati straordinari. Non v'è dubbio che vale la pena di perseguire sforzi di questo genere. Ma il loro risultato è un linguaggio che — come quelli impiegati nelle scienze — contiene implicite una serie di aspettative alle quali la natura dovrebbe rispondere e cessa di funzionare nel momento in cui queste aspettative vengono deluse. Nelson Goodman chiarisce con esattezza questo punto nel descrivere gli scopi della sua opera *Structure of Appearance*: «È una fortuna che nient'altro [oltre ai fenomeni la cui esistenza è nota] è in discussione; infatti la nozione di casi “possibili”, di casi che non esistono ma che avrebbero potuto esistere, è tutt'altro che chiara» {117}. Ma un linguaggio, che si limiti in tal modo a descrivere un mondo completamente conosciuto in anticipo, non può riferire «il dato» in maniera totalmente neutrale ed obiettiva. La ricerca filosofica non ha finora fornito neppure un vago accenno su come dovrebbe essere fatto un linguaggio capace di fare ciò.

In simili circostanze possiamo almeno mettere in dubbio che gli scienziati abbiano ragione in linea di principio, e anche in pratica, quando trattano l'ossigeno ed i pendoli (e forse anche gli

atomi e gli elettroni) come gli elementi fondamentali della loro esperienza immediata. In conseguenza dell'esperienza, fatta sotto la guida di paradigmi, del mondo umano, della cultura e infine della professione, il mondo dello scienziato è diventato popolato di pianeti e di pendoli, di condensatori, di minerali composti e di tanti altri oggetti simili. In confronto a questi oggetti della percezione, sia le letture del metro che le impressioni retiniche sono costruzioni elaborate, cui l'esperienza ha diretto accesso soltanto quando lo scienziato, per gli speciali scopi della sua ricerca, predispone che l'uno o l'altro di essi vi si presti. Ciò non equivale a dire che i pendoli, ad esempio, sono le uniche cose che uno scienziato potrebbe vedere quando guarda una pietra oscillante. (Abbiamo già fatto notare che i membri di una comunità scientifica diversa potrebbero vedervi una caduta vincolata). Ma significa suggerire che lo scienziato che guarda una pietra oscillante può non fare affatto una esperienza che sia, in linea di principio, più elementare del vedere un pendolo. L'alternativa non è rappresentata da qualche ipotetica visione «determinata e immutabile», ma da una visione attraverso un altro paradigma, ossia attraverso un paradigma che fa sì che la pietra oscillante si presenti come qualcos'altro.

Tutto questo può sembrare più ragionevole se ricordiamo ancora una volta che né gli scienziati né i profani imparano a vedere il mondo in modo frammentario e pezzo a pezzo. Fatta eccezione per il caso in cui tutte le categorie concettuali e manipolative sono già pronte in anticipo — come quando «i tratta di scoprire un nuovo elemento transuranico o di visitare una casa nuova — sia gli scienziati che i profani traggono ampie informazioni dal flusso dell'esperienza. Il bambino che trasferisce la parola 'mamma' da tutti gli esseri umani a tutte le donne e quindi alla propria madre non sta semplicemente imparando che cosa significa 'mamma' o chi sia sua madre. Egli impara nello stesso tempo alcune differenze tra uomini e donne e anche qualcosa sul modo in cui tutte le donne eccetto una si comporteranno verso di lui. Le sue reazioni, le sue aspettative e le sue opinioni — e quindi, gran parte del suo mondo percettivo — vengono modificate corrispondentemente. Considerando le cose da questo stesso punto di vista, i copernicani che negavano al sole il suo tradizionale titolo di 'pianeta' imparavano non solo che cosa significava 'pianeta' o che cos'era il sole; al contrario essi

mutavano il significato del termine 'pianeta' in modo che esso potesse continuare ad operare utili distinzioni in un mondo in cui tutti i corpi celesti, e non solo il sole, venivano visti in modo differente da come erano stati visti prima. Lo stesso discorso potrebbe essere fatto a proposito di tutti gli altri esempi fatti precedentemente. Vedere ossigeno invece di aria deflogistizzata, il condensatore invece della bottiglia di Leyda o il pendolo invece della caduta vincolata era soltanto una parte del totale cambiamento di visione che si verificò nello scienziato nei confronti di un gran numero di fenomeni rispettivamente chimici, elettrici, o dinamici. I paradigmi determinano ogni volta vaste aree di esperienza.

È però soltanto dopo che l'esperienza è stata determinata in questo modo che può cominciare la ricerca di una definizione operativa o di un puro linguaggio osservativo. Lo scienziato o il filosofo, che chiedono quali misurazioni e quali impressioni retiniche permettono al pendolo di apparire ciò che è, devono già essere in grado di riconoscere un pendolo quando ne vedono uno. Se invece essi vi vedessero una caduta vincolata, non potrebbero neppure porsi una domanda del genere. E se vedessero un pendolo, ma lo vedessero nello stesso modo in cui vedono un diapason o una bilancia oscillante, la loro questione non potrebbe trovare risposta. O perlomeno non potrebbe ricevere la stessa risposta, poiché non sarebbe la stessa questione. Perciò, sebbene siano sempre legittimi e spesso straordinariamente fecondi, gli interrogativi che vengono posti a proposito delle impressioni retiniche o delle conseguenze di particolari manipolazioni di laboratorio presuppongono un mondo che sia già stato percettivamente e concettualmente suddiviso in un certo modo. In un certo senso, tali questioni fanno parte della scienza normale, giacché esse dipendono dall'esistenza di un paradigma e ricevono risposte differenti in conseguenza di un mutamento di paradigma.

Per concludere questo capitolo, trascuriamo d'ora in poi le impressioni retiniche e concentriamo ancora una volta la nostra attenzione sulle operazioni di laboratorio che procurano allo scienziato elementi conoscitivi concreti, sebbene frammentari, di ciò che egli ha già visto. Abbiamo già più volte esaminato una maniera secondo cui tali operazioni di laboratorio mutano col mutare di paradigmi. Dopo una rivoluzione scientifica, molte vecchie misurazioni e manipolazioni non sono più ritenute

appropriate e sono sostituite da altre. Non ha senso sottoporre l'ossigeno a tutte le stesse prove sperimentali cui veniva sottoposta l'aria deflogistizzata. Ma i cambiamenti di questo genere non sono mai totali. Qualunque cosa sia ciò che riesce a vedere dopo una rivoluzione, lo scienziato guarda pur sempre lo stesso mondo. Inoltre, gran parte del suo linguaggio e dei suoi strumenti di laboratorio sono ancora gli stessi di prima, sebbene possa averli precedentemente usati in modo diverso. Di conseguenza la scienza post-rivoluzionaria invariabilmente ripete molte delle stesse manipolazioni, compiendole con gli stessi strumenti e descrivendole con gli stessi termini, della scienza dell'epoca pre-rivoluzionaria che l'ha preceduta. Se le manipolazioni che sono state conservate sono mutate in qualche cosa, il cambiamento deve risiedere o nella loro relazione col paradigma o nei loro risultati concreti. A mio avviso, si verificano entrambi i generi di cambiamento, come spiegherò discutendo l'ultimo nuovo esempio che introdurrò. Esaminando l'opera di Dalton e dei suoi contemporanei, scopriremo che una stessa operazione, quando affronta la natura basandosi su di un paradigma differente, può rivelare un aspetto completamente diverso della sua regolarità. Oltre a ciò, vedremo che di tanto in tanto il vecchio tipo di manipolazione, nel suo nuovo ruolo, darà luogo a risultati concreti differenti.

Per gran parte del XVIII secolo e fino al XIX secolo inoltrato i chimici europei quasi senza eccezioni credettero che gli atomi elementari di cui tutte le sostanze chimiche erano composte fossero tenuti insieme da forze di mutua affinità. Così, un pezzetto di argento si manteneva coerente a causa delle forze di affinità tra le particelle di argento (fin dopo Lavoisier queste particelle erano concepite come a loro volta composte da particelle ancor più elementari). Sulla base della stessa teoria, l'argento si scioglieva nell'acido (o il sale nell'acqua) perché le particelle di acido attraevano quelle di argento (o le particelle d'acqua attraevano quelle di sale) in modo più energico di quanto le particelle della sostanza che si scioglieva si attraessero tra di loro. O ancora, il rame si scioglieva nella soluzione di argento e faceva precipitare l'argento, perché l'affinità tra il rame e l'acido era maggiore di quella tra l'acido e l'argento. Moltissimi altri fenomeni venivano spiegati allo stesso modo. Nel XVIII secolo la teoria dell'affinità elettiva fu un ottimo paradigma chimico, largamente impiegato

nella impostazione e nell'analisi degli esperimenti chimici e spesso fecondo di risultati {118}.

La teoria dell'affinità, però, tracciò una linea di separazione tra mescolanze fisiche e composti chimici che cessò di essere accettata solo dopo l'assimilazione dell'opera di Dalton.

I chimici del XVIII secolo riconoscevano due generi di processi. Quando mescolando più sostanze si produceva calore, luce, effervescenza o qualcos'altro del genere, si riteneva che fosse avvenuta una reazione chimica. Se, al contrario, le particelle che venivano mescolate potevano essere distinte a occhio nudo o separate meccanicamente, si trattava soltanto di una mescolanza fisica. Ma in tutti i numerosi casi intermedi — sale nell'acqua, leghe, vetro, ossigeno nell'atmosfera, e così via — questi criteri grossolani erano di scarso aiuto. Guidati dal loro paradigma, la maggior parte dei chimici consideravano tutti i fenomeni appartenenti a questo tipo intermedio come fenomeni chimici dato che i processi in cui consistevano erano tutti governati da forze dello stesso genere. Il sale nell'acqua o l'ossigeno nell'azoto erano esempi di combinazione chimica così come lo era la combinazione prodotta dall'ossidamento del rame. Gli argomenti che giustificavano il fatto di considerare le soluzioni come composti erano molto solidi. La stessa teoria dell'affinità era ben affermata. Inoltre, la formazione di un composto spiegava l'omogeneità che si osservava in una soluzione. Se, per esempio, l'atmosfera era composta di ossigeno e di azoto mescolati soltanto, ma non combinati fra loro, il gas più pesante, l'ossigeno, si sarebbe dovuto depositare negli strati inferiori dell'atmosfera. Dalton, che considerava l'atmosfera come una mescolanza, non fu mai in grado di spiegare in maniera soddisfacente il fatto che l'ossigeno non si comportasse in questo modo. L'assimilazione della teoria atomica da lui proposta finì col creare un'anomalia laddove prima non ve n'era stata nessuna {119}.

Si sarebbe tentati di dire che i chimici che consideravano le soluzioni come composti differivano dai loro successori soltanto per una questione di definizione. In un certo senso può darsi che la differenza fosse davvero tutta qui. Ma in tal caso, le definizioni non potrebbero essere considerate semplicemente degli elementi di comodo convenzionali. Nel XVIII secolo non si riusciva a distinguere completamente i composti dalle mescolanze per mezzo di prove sperimentali, e forse non sarebbe stato possibile

riuscirci. Anche se i chimici fossero andati alla ricerca di simili prove, avrebbero sempre cercato criteri che facevano considerare le soluzioni come composti. La distinzione mescolanza-composto faceva parte del loro paradigma — faceva parte del loro modo di considerare l'intero campo della ricerca — e come tale era preliminare ad ogni particolare prova di laboratorio, sebbene non all'esperienza cumulativa della chimica nel suo complesso.

Ma finché la chimica fu considerata in questo modo, i fenomeni chimici esemplificarono leggi differenti da quelle che comparvero con l'assimilazione del nuovo paradigma di Dalton. In particolare, finché le soluzioni continuarono ad essere considerate composti, nessun esperimento chimico poteva di per se stesso produrre la legge delle proporzioni fisse. Alla fine del XVIII secolo, era largamente noto che *alcuni* composti di solito contenevano i loro componenti in proporzioni determinate di peso. Per alcune categorie di relazioni, il chimico tedesco Richter aveva persino notate le ulteriori regolarità, che oggi vengono contemplate dalla legge degli equivalenti chimici {120}. Ma nessun chimico fece uso di queste regolarità eccetto che nelle ricette, e nessuno fin quasi alla fine del secolo pensò di generalizzarle. Data l'esistenza di fatti manifestamente in contraddizione con quelle regolarità, quali il vetro o la soluzione di sale in acqua, non era possibile fare generalizzazioni senza abbandonare la teoria della affinità e senza rielaborare i concetti che limitavano il dominio del chimico. Questo fatto divenne esplicito alla fine del secolo nel famoso dibattito tra i chimici francesi Proust e Berthollet. Il primo sosteneva la tesi che tutte le reazioni chimiche avvenivano secondo proporzioni fisse, il secondo era di opinione contraria. Ciascuno di loro raccolse un'impressionante documentazione sperimentale a favore della propria tesi. Tuttavia i due scienziati finirono necessariamente per parlare fra di loro, ed il loro dibattito non portò a nessuna conclusione. Dove Berthollet vedeva un composto che poteva variare nelle proporzioni dei componenti, Proust vedeva soltanto una mescolanza fisica {121}. Né l'esperimento né un cambiamento della definizione convenzionale potevano servire ai fini della questione in discussione. I due scienziati parlavano linguaggi troppo diversi, così, come era successo per Galileo ed Aristotele.

Questa era la situazione negli anni in cui John Dalton affrontò le ricerche che dovevano alla fine condurlo alla sua famosa teoria

chimica atomica. Ma fino alle ultimissime fasi di queste ricerche, Dalton non era un chimico né era interessato alla chimica. Era invece un meteorologo che studiava quelli che per lui erano i problemi fisici dell'assorbimento di gas da parte dell'acqua e di acqua da parte dell'atmosfera. In parte perché la sua formazione era avvenuta in un campo di specializzazione diverso, in parte a causa dell'attività di ricerca che egli stesso aveva svolto in questo campo, egli affrontò quei problemi basandosi su di un paradigma diverso da quello seguito dai chimici suoi contemporanei. In particolare egli considerò la mescolanza di gas o l'assorbimento di un gas da parte dell'acqua come un processo fisico, nel quale le forze di affinità non svolgevano alcun ruolo. Per lui, quindi, la omogeneità che si osservava nelle soluzioni costituiva un problema, ma un problema che che egli riteneva di poter risolvere se avesse potuto determinare le dimensioni ed i pesi relativi delle diverse particelle atomiche nelle mescolanze ottenute nei suoi esperimenti. Fu per determinare questi pesi e queste dimensioni che Dalton si rivolse finalmente alla chimica, supponendo fin dall'inizio che, entro il ristretto ambito di reazioni che egli considerava chimiche, gli atomi potevano combinarsi soltanto uno ad uno o in qualche altro semplice rapporto di numeri interi {122}. Questa assunzione naturale gli permise di determinare le dimensioni e i pesi delle particelle elementari, ma anche fece sì che la legge della proporzione costante diventasse una tautologia. Per Dalton, ogni reazione nella quale gli ingredienti non si combinassero in una proporzione fissa era *ipso facto* un processo non puramente chimico. Una legge, che prima dell'opera di Dalton l'esperimento non avrebbe potuto stabilire, diventò, una volta che le sue ricerche furono generalmente riconosciute come valide, un principio fondamentale che nessun particolare insieme di misurazioni chimiche avrebbe potuto mettere in dubbio in conseguenza di quello che forse è il nostro esempio più completo di rivoluzione scientifica, le stesse manipolazioni chimiche assunsero, rispetto alla generalizzazione chimica, un rapporto molto diverso da quello che avevano avuto prima.

È inutile dire che le conclusioni di Dalton vennero ampiamente attaccate quando furono annunciate per la prima volta. Berthollet, in particolare, non ne fu mai convinto. Ma, considerando la natura della questione in discussione, non avrebbe potuto esserlo. Per la maggior parte dei chimici, invece, il nuovo paradigma di Dalton si

dimostrò convincente là dove quello di Proust non lo era stato, giacché esso ebbe implicazioni di portata più vasta e di maggiore importanza di quante avrebbe potuto averne un nuovo criterio per distinguere una mescolanza da un composto. Se, per esempio, gli atomi potevano combinarsi chimicamente soltanto in semplici rapporti di numeri interi, allora un riesame dei dati chimici esistenti avrebbe dovuto mettere in luce esempi di proporzioni multiple, oltre che fisse. I chimici smisero di scrivere che i due ossidi di carbonio (ossido carbonico e anidride carbonica) contenevano rispettivamente il 56 per cento ed il 72 per cento di ossigeno in peso; cominciarono invece a scrivere che una unità di peso di carbonio si sarebbe combinata con 1, 3 o con 2, 6 unità di peso di ossigeno. Quando i risultati ottenuti con le manipolazioni tradizionali vennero registrati in questa nuova forma, balzò all'occhio il rapporto di 2:1; e ciò si verificò nella analisi di molte reazioni note e di parecchie nuove. Oltre a ciò, il paradigma di Dalton rese possibile l'assimilazione delle ricerche di Richter e permise di vederne la completa generalità. Esso suggerì inoltre nuovi esperimenti, in particolare quelli di Gay-Lussac sui volumi di gas che entravano in combinazione e questi svelarono ulteriori regolarità che i chimici non avrebbero potuto nemmeno immaginare prima d'allora. Ciò che i chimici ricavarono dall'opera di Dalton non furono nuove leggi sperimentali, ma un modo nuovo di praticare la chimica (egli stesso lo chiamò il «nuovo sistema di filosofia chimica»), e questo si dimostrò subito così fecondo, che soltanto pochi fra i vecchi chimici in Francia ed in Inghilterra riuscirono a resistergli {123}. Come conseguenza, i chimici vennero a vivere in un mondo nel quale le reazioni si comportavano in maniera abbastanza differente da come si comportavano prima.

Mentre si svolgevano questi fatti, si verificò un altro mutamento tipico e importante. Qua e là, i dati numerici della chimica cominciarono a traballare. Quando Dalton in un primo momento cercò nella letteratura chimica dei dati che sostenessero la sua teoria fisica, trovò alcune analisi di reazioni che si adattavano, ma non poté evitare di imbattersi in altre reazioni che non andavano bene. Anche le misurazioni compiute da Proust relativamente ai due ossidi di rame davano, ad esempio, un rapporto di peso di ossigeno di 1, 47: 1, invece che il rapporto di 2: 1 richiesto dalla teoria atomica; e Proust era proprio l'uomo da cui ci si sarebbe potuti aspettare una conferma del rapporto

daltoniano {124}. Era infatti uno sperimentatore acuto e il suo modo di concepire il rapporto tra mescolanze e composti era molto vicino a quello di Dalton. Ma è difficile far sì che la natura si adatti ad un paradigma. Questa è la ragione per la quale i rompicapo della scienza normale rappresentano una vera sfida e per la stessa ragione ci possiamo spiegare perché le misurazioni che non si appoggiano ad un paradigma raramente portano a qualche conclusione. I chimici perciò non avrebbero potuto accettare la teoria di Dalton semplicemente sulla base di prove sperimentali, giacché la maggior parte di queste erano ancora negative. Al contrario, anche dopo aver accettato la teoria, essi dovettero ancora forzare la natura entro schemi prestabiliti, processo questo che, nel caso specifico, durò quasi per un'altra generazione. Quando fu ultimato, persino la composizione percentuale dei composti più noti era differente. I dati stessi erano mutati. Questo è l'ultimo dei sensi in cui possiamo dire che, dopo una rivoluzione, gli scienziati lavorano in un mondo differente.

Capitolo undicesimo.

La invisibilità delle rivoluzioni

Dobbiamo ancora chiederci come si concludono le rivoluzioni scientifiche. Prima di rispondere a tale domanda, però, può essere necessario fare un ultimo tentativo per rafforzare le convinzioni che ci siamo fatte a proposito della loro esistenza e della loro natura. Finora ho cercato di mettere in luce i caratteri delle rivoluzioni ricorrendo a fatti che le illustrano e gli esempi potrebbero essere moltiplicati fino alla nausea. Certamente, la maggior parte di questi fatti, che sono stati scelti deliberatamente per l'ampia conoscenza che tutti ne hanno, erano stati di solito considerati non come rivoluzioni, ma come eventi in cui nuovi elementi si erano aggiunti alla conoscenza scientifica. La stessa concezione potrebbe benissimo essere applicata anche ad altri fatti i quali tuttavia, probabilmente, non riuscirebbero a dimostrarla. Posso suggerire che vi sono eccellenti ragioni che spiegano perché le rivoluzioni si sono dimostrate così invisibili. Sia gli scienziati che i profani ricavano gran parte dell'immagine che si fanno della attività scientifica creativa da una fonte autoritaria, che sistematicamente cela — in parte per importanti ragioni funzionali — l'esistenza e il significato delle rivoluzioni scientifiche. Soltanto quando si è riconosciuta e analizzata la natura di quell'autorità si può sperare di rendere gli esempi storici completamente efficaci. Inoltre, l'analisi che si rende necessaria ora comincerà ad indicare uno degli aspetti della ricerca scientifica che più chiaramente la distingue da ogni altra attività creativa, fatta eccezione forse per la teologia; questo argomento verrà poi sviluppato completamente nel capitolo conclusivo.

Per quanto riguarda la fonte dell'autorità, ho in mente soprattutto i manuali scientifici, e, accanto a questi, le opere di

divulgazione e le opere filosofiche modellate su di essi. Queste tre categorie di opere — fino ad un'epoca molto recente nessun'altra importante fonte d'informazione scientifica era disponibile, eccettuata la stessa attività di ricerca — hanno tutte una cosa in comune. Esse si rivolgono ad un corpo di problemi, di dati e di teorie già articolato, molto spesso a quel particolare insieme di paradigmi cui la comunità scientifica è vincolata nel momento in cui esse vengono scritte. I manuali mirano a comunicare il vocabolario e la sintassi di un linguaggio scientifico contemporaneo. Le opere di divulgazione cercano di descrivere quelle stesse applicazioni in un linguaggio più vicino a quello della vita d'ogni giorno. E la filosofia della scienza, particolarmente quella di lingua inglese, analizza la struttura logica del medesimo corpo completo di conoscenza scientifica. Mentre per una trattazione più completa non si potrebbero ignorare le distinzioni reali che esistono tra questi tre generi, qui ci interessano soprattutto le loro somiglianze. Tutte e tre registrano i risultati permanenti prodotti dalle rivoluzioni passate, e così fanno conoscere i fondamenti della tradizione della scienza normale corrente. Per adempiere della loro funzione non hanno bisogno di fornire informazioni autentiche sul modo in cui questi fondamenti furono riconosciuti per la prima volta e quindi accettati dagli specialisti. Per lo meno nel caso dei manuali d sono anche delle buone ragioni perché, su argomenti come questi, l'informazione debba essere sistematicamente falsata.

Abbiamo notato nel capitolo II che una fiducia crescente nei manuali o nei loro equivalenti era una caratteristica sempre presente nei periodi in cui, in un determinato campo della scienza, si fa strada un primo paradigma. Il capitolo conclusivo di questo saggio svolgerà la tesi che il fatto che una scienza matura sia dominata da simili testi differenzia in modo significativo il suo schema di sviluppo da quello di altri campi. Per il momento ammettiamo senz'altro che, in una misura che non ha riscontro in altri campi, la conoscenza che sia il profano che lo specialista hanno della scienza è basata su manuali e su pochi altri tipi di letteratura derivanti da essi. I manuali, però, essendo degli strumenti pedagogia costruiti per trasmettere la scienza normale, vanno riscritti interamente o in parte ogni volta che mutano il linguaggio, la struttura dei problemi o i criteri della scienza normale. In breve, essi vanno riscritti in ciascun periodo

successivo a una rivoluzione scientifica e, una volta che siano stati riscritti, inevitabilmente celano non soltanto il ruolo ma anche l'esistenza stessa delle rivoluzioni che li hanno prodotti. A meno che non abbia fatto personalmente esperienza di una rivoluzione nel corso della sua vita, il senso storico di uno scienziato o di un lettore profano di manuali arriva soltanto a riconoscere i risultati delle più recenti rivoluzioni avvenute nel campo in questione.

I manuali cominciano così col distruggere il senso che lo scienziato ha della storia della propria disciplina, e, ottenuto questo, gli offrono un sostituto per ciò che hanno eliminato. È tipico che i manuali scientifici contengano soltanto un accenno alla storia, contenuto in un capitolo introduttivo, oppure, più spesso, disperso in notizie frammentarie che ricordano i grandi eroi di un'epoca passata. Tali riferimenti danno, sia allo studente che allo specialista, la sensazione di partecipare a una lunga tradizione storica. Tuttavia la tradizione ricavata dai manuali, alla quale gli scienziati hanno la sensazione di partecipare, non è mai esistita di fatto. Per ragioni che sono tanto ovvie quando straordinariamente funzionali, i manuali scientifici (e molte vecchie storie della scienza) fanno riferimento soltanto a quella parte della ricerca svolta dagli scienziati del passato che può facilmente essere considerata un contributo alla formulazione e alla soluzione dei problemi proposti dal paradigma accettato dai manuali stessi. In parte per selezione e in parte per distorsione, gli scienziati delle età precedenti sono implicitamente presentati come se la loro attività si fosse svolta intorno allo stesso insieme di problemi fissi ed in accordo con lo stesso insieme di canoni permanenti che la più recente rivoluzione nella teoria e nel metodo ha dichiarato scientifici. Non fa meraviglia che i manuali e la tradizione storica che essi implicano debbano essere rielaborati dopo ogni rivoluzione scientifica. E non fa meraviglia che, dopo che la rielaborazione è stata fatta, la scienza finisce ancora una volta col sembrare largamente cumulativa.

Gli scienziati non sono, ovviamente, l'unico gruppo che tende a vedere lo sviluppo passato della propria disciplina come un progresso lineare verso il suo stato presente. La tentazione di scrivere la storia all'indietro è presente dovunque e non muore mai. Ma gli scienziati sono più facilmente soggetti alla tentazione di riscrivere la storia, in parte perché i risultati della ricerca scientifica non presentano una dipendenza evidente dal contesto

storico della ricerca, e in parte perché, tranne che durante una crisi o una rivoluzione, la posizione attuale dello scienziato sembra estremamente sicura. Un maggior numero di particolari storici che riguardino sia il presente che il passato della scienza, o una maggiore attenzione prestata a questi particolari non servirebbero che a far riconoscere senza necessità le idiosincrasie, gli errori e la confusione umane. Perché dare un valore e una dignità a ciò che i migliori e più costanti sforzi della scienza hanno reso possibile abbandonare? La svalutazione del fatto storico è profondamente radicata e ciò probabilmente ha una sua funzionalità, nella ideologia della professione scientifica, quella stessa professione che attribuisce la massima importanza a particolari di altro genere. Whitehead colse lo spirito antistorico della comunità scientifica quando scrisse: «Una scienza che esita a dimenticare i suoi fondatori è perduta». Tuttavia, egli non aveva completamente ragione, poiché la scienza, come altre corporazioni professionali, ha bisogno di eroi e ne conserva i nomi. Invece di dimenticare questi eroi, gli scienziati sono riusciti con gran facilità a dimenticare o a travisare le loro opere.

Da ciò deriva una persistente tendenza a fare apparire la storia della scienza come un processo lineare o cumulativo, tendenza che influenza persino gli scienziati che si volgono indietro a riconsiderare la loro stessa ricerca. Ad esempio, i tre resoconti, incompatibili fra loro, che Dalton dette dello sviluppo del proprio atomismo chimico indicano tutti che fin da una data molto remota egli era interessato proprio a quei problemi chimici dei rapporti di combinazione, per aver risolto i quali egli diventò poi famoso. Di fatto, sembra che quei problemi gli si siano presentati soltanto insieme con le loro soluzioni, e non prima che la sua opera creativa fosse quasi completa {125}. Ciò che tutti i resoconti forniti da Dalton omettono sono gli effetti rivoluzionari ottenuti applicando alla chimica un insieme di problemi e di concetti che erano stati precedentemente limitati al campo della fisica e della meteorologia. Questo è ciò che Dalton fece effettivamente e il cui risultato fu un riorientamento di tutte le concezioni della chimica, un riorientamento che insegnò ai chimici a porsi nuovi problemi sulla base dei vecchi dati e a trarre nuove conclusioni da essi.

E ancora, Newton scrisse che Galileo aveva scoperto che la forza costante di gravità produce un movimento proporzionale al quadrato del tempo. Di fatto, il teorema cinematico di Galileo

assume quella forma soltanto quando viene incorporato nella matrice dei concetti dinamici newtoniani. Ma Galileo non disse nulla del genere. La sua discussione della caduta dei gravi raramente fa riferimento alle forze, e tanto meno fa riferimento a una forza gravitazionale uniforme che causa la caduta dei gravi {126}. Attribuendo a Galileo la risposta ad una questione che i paradigmi di Galileo non permettevano neanche di formulare, l'esposizione di Newton nasconde l'azione di una piccola, ma rivoluzionaria, riformulazione dei problemi che gli scienziati si ponevano riguardo al moto, come delle risposte che essi avrebbero potuto accettare. Ma è proprio questo genere di mutamento nella formulazione di problemi e di risposte che spiega, in misura molto maggiore di nuove scoperte empiriche, il passaggio dalla dinamica aristotelica a quella galileiana e da quest'ultima a quella newtoniana. Trascurando tali mutamenti, la tendenza dei manuali a rendere lineare lo sviluppo della scienza nasconde un processo che è fondamentale negli episodi più significativi dello sviluppo scientifico.

Gli esempi considerati sopra mettono in luce, ciascuno entro il contesto di una rivoluzione particolare, gli inizi di una ricostruzione della storia che è regolarmente condotta a termine dai manuali scientifici post-rivoluzionari. Ma in questa operazione di completamento operata dai manuali c'è qualcosa di più di una moltiplicazione dei travisamenti storici illustrati sopra. Tali travisamenti rendono invisibili le rivoluzioni; l'ordinamento del materiale ancora visibile nei manuali scientifici presuppone un processo che, se esistesse, negherebbe ogni funzione alle rivoluzioni. Poiché essi mirano ad informare rapidamente lo studente su quello che la comunità scientifica contemporanea pensa di sapere, i manuali trattano i vari esperimenti, concetti, leggi, e teorie della scienza normale corrente in modo il più possibile sistematico e ordinato per argomento. Dal punto di vista pedagogico una simile tecnica di presentazione è ineccepibile. Ma quando a ciò si aggiunge lo stile generalmente antistorico degli scritti scientifici e, di tanto in tanto, i travisamenti sistematici discussi nelle pagine precedenti, è assai probabile che come risultato si ottenga una convinzione difficilmente superabile secondo cui la scienza ha raggiunto il suo stato attuale attraverso una serie di scoperte e di invenzioni singole che, quando vengono raccolte tutte insieme, costituiscono il corpo della conoscenza

tecnica moderna. La presentazione manualistica presuppone che, fin dall'inizio dell'attività scientifica, gli scienziati abbiano rivolto i loro sforzi verso quegli argomenti particolari che sono incorporati negli odierni paradigmi. Uno dopo l'altro, in un processo spesso paragonato a porre un mattone sopra all'altro per formare un edificio, gli scienziati hanno aggiunto nuovi fatti, concetti, leggi e teorie a corpo di informazioni fornito dal manuale scientifico contemporaneo.

Ma questo non è il modo in cui si sviluppa la scienza. La maggior parte del rompicapo della scienza normale contemporanea non esistevano fino a dopo la rivoluzione scientifica più recente. Ben pochi di essi possono essere fatti risalire all'inizio dello sviluppo storico della scienza entro la quale si presentano oggi. Le generazioni precedenti studiavano i loro propri problemi coi loro propri strumenti e coi loro propri canoni di soluzione. E non sono soltanto i problemi ad essere cambiati. Piuttosto, è l'intera struttura di fatti e di teorie che il paradigma dei manuali adatta alla natura che è stata trasformata. La costanza della composizione chimica, ad esempio, è forse un puro fatto di esperienza che i chimici avrebbero potuto scoprire con l'esperimento all'interno di uno qualsiasi dei mondi entro i quali i chimici hanno svolto la loro attività? O non è piuttosto un elemento dall'interno di una nuova struttura formata di quell'insieme di fatti e di teorie che Dalton ha applicato alla precedente esperienza chimica considerata nella sua globalità, modificando tale esperienza nel corso di tale processo? Oppure, considerando le cose dallo stesso punto di vista, l'accelerazione costante prodotta da una (orza costante è forse un puro fatto che gli studiosi della dinamica hanno sempre studiato, o non è piuttosto la risposta a una questione che si pose per la prima volta soltanto all'interno della teoria newtoniana e alla quale quella teoria poteva dare una risposta grazie al corpo di informazioni di cui essa disponeva già prima che si ponesse la questione?

Le domande che abbiamo formulato concernono quelli che in una presentazione manualistica si presentano come fatti scoperti in modo disorganico, uno a uno. Ma ovviamente le stesse domande possono essere ripetute anche per quelle che i manuali presentano come teorie. Queste teorie, certamente, «si adattano ai fatti», ma soltanto dopo aver trasformato le informazioni di cui si era già in possesso in fatti che per il precedente paradigma non

esistevano neanche. E questo significa che neppure le teorie si sviluppano in modo disorganico e frammentario, per adattarsi a fatti che sono sempre esistiti. Piuttosto, esse sorgono, assieme ai fatti dei quali forniscono una spiegazione, da una riformulazione rivoluzionaria della tradizione scientifica precedente, una tradizione entro la quale il rapporto, mediato dalla conoscenza, tra lo scienziato e la natura era fundamentalmente diverso.

Un ultimo esempio può chiarire le nostre considerazioni a proposito dell'influenza che la presentazione manualistica esercita sull'immagine che si fa dello sviluppo scientifico. Ogni manuale di chimica elementare deve discutere il concetto di elemento chimico. Quasi sempre, quando viene introdotta questa nozione, ne viene attribuita l'origine a Robert Boyle, chimico del XVII secolo, nella cui opera intitolata *Il chimico scettico* il lettore attento troverà una definizione di 'elemento' assai simile a quella in uso oggi. Il riferimento al contributo di Boyle serve a rendere cosciente il neofita del fatto che la chimica non è cominciata coi sulfamidici; e nello stesso tempo gli insegna che uno dei compiti tradizionali dello scienziato è quello di inventare concetti di questo genere. Come parte del bagaglio pedagogico che serve a formare uno scienziato, quella attribuzione è utilissima. Nondimeno, essa illustra ancora una volta il tipo di errori storici che danno sia agli studenti che ai profani un'idea erronea sulla natura dell'attività scientifica.

Secondo Boyle, il quale aveva assolutamente ragione, la sua «definizione» di elemento non era altro che la parafrasi di un concetto chimico tradizionale; Boyle la riportava soltanto allo scopo di sostenere la tesi che un elemento chimico definibile in quel modo non esiste; dal punto di vista storico, la versione manualistica del contributo di Boyle è completamente sbagliata {127}. Un errore di questo genere è, naturalmente, insignificante, sebbene non lo sia di più che un qualsiasi altro travisamento di dati. Ciò che non è insignificante però, è l'idea di scienza che viene alimentata quando questo genere di errore viene prima concepito e poi incorporato nella struttura tecnica del manuale. Come i concetti di 'tempo', 'energia', 'forza', o 'particella', il concetto di elemento è quel genere di ingrediente manualistico che spesso non viene neppure inventato o scoperto. La definizione di Boyle, in particolare, può essere fatta risalire almeno ad Aristotele e se ne può tracciare la storia successiva, attraverso Lavoisier, fino ai

manuali moderni. Ciò però non equivale a dire che la scienza abbia posseduto il concetto moderno di elemento sin dall'antichità. Definizioni verbali come quella di Boyle hanno scarso contenuto scientifico quando siano considerate in se stesse. Esse non sono spiegazioni logiche, complete e dettagliate, di un significato (ammesso che ne possano esistere), ma piuttosto aiuti pedagogici. I concetti scientifici, su cui esse dirigono l'attenzione, acquistano pieno significato soltanto quando vengono collegati, all'interno di un manuale o di qualsiasi altra presentazione sistematica, ad altri concetti scientifici, a procedimenti sperimentali e ad applicazioni di paradigmi. Di conseguenza è improbabile che concetti come quello di elemento possano venire inventati indipendentemente da un contesto. D'altra parte, se il contesto esiste, di solito non hanno bisogno di essere inventati, perché sono già a portata di mano. Sia Boyle che Lavoisier cambiarono il significato chimico del termine 'elemento' in maniera importante. Ma essi non inventarono il concetto corrispondente e neppure mutarono la formula verbale che serve alla sua definizione. Analogamente, Einstein, come abbiamo visto, non dovette inventare e neanche ridefinire esplicitamente le nozioni di 'spazio' e di 'tempo' allo scopo di dare ad essi un significato nuovo entro il contesto della sua ricerca.

Quale fu allora la funzione storica di Boyle in quella parte della sua ricerca che comprende la famosa «definizione»? Egli fu l'esponente di una rivoluzione scientifica che, mutando il rapporto che il concetto di «elemento» aveva con la manipolazione e la teoria chimiche, lo trasformò in uno strumento completamente differente da quello che era stato prima, e nel corso di questo processo trasformò sia la chimica che il mondo del chimico {128}. Altre rivoluzioni, fra le quali quella che si accentra sulla figura di Lavoisier, si resero necessarie per dare al concetto la sua forma e la sua funzione moderna. Ma Boyle offre un tipico esempio sia del processo implicito in ciascuna di quelle fasi, sia di ciò che accade al processo quando la conoscenza esistente è incorporata in un manuale. Quella forma pedagogica ha determinato, più d'ogni altro singolo aspetto della scienza, la nostra immagine della natura della scienza e del ruolo che l'invenzione e la scoperta svolgono per il suo sviluppo.

Capitolo dodicesimo.

La soluzione delle rivoluzioni

I manuali che abbiamo appena finito di discutere vengono prodotti soltanto nel periodo immediatamente successivo ad una rivoluzione scientifica. Essi costituiscono le basi di una nuova tradizione di scienza normale. Nel discutere la questione della loro struttura, abbiamo evidentemente trascurato un punto. Quale è il processo in virtù del quale una nuova teoria che ha i requisiti per diventare un paradigma riesce a soppiantare il vecchio paradigma? Ogni nuova interpretazione della natura, sia essa una scoperta o una teoria, sorge dapprima nella mente di un singolo o di pochi individui. Sono essi che per primi imparano a vedere la scienza e il mondo in maniera differente, e la loro capacità di fare questo cambiamento è facilitata da due condizioni in cui non si trovano la maggior parte degli altri membri della loro specializzazione. Invariabilmente la loro attenzione è stata concentrata intensamente sui problemi che provocano la crisi; inoltre essi sono, di solito, così giovani o così nuovi al campo oppresso dalla crisi che la pratica scientifica non li ha ancora così profondamente condizionati come la maggior parte dei loro contemporanei alla concezione del mondo e alle regole determinate dal vecchio paradigma. In che modo riescono, e che cosa debbono fare per riuscire a convertire l'intero gruppo degli specialisti o il sottogruppo di essi più interessato al problema, al loro modo di considerare la scienza e il mondo? Che cosa spinge un gruppo ad abbandonare una tradizione di ricerca scientifica a favore di un'altra?

Per rendersi conto dell'urgenza di questioni come queste, si ricordi che esse sono le uniche ricostruzioni che lo storico può offrire al filosofo che voglia studiare i processi di prova,

verificazione o falsificazione di teorie scientifiche accettate.

Nella misura in cui è impegnato nella ricerca normale, il ricercatore ha il compito di risolvere rompicapo, non di mettere alla prova i paradigmi. Anche se può, ricercando una soluzione per un determinato rompicapo, tentare parecchi approcci alternativi, abbandonando quelli che non riescono a dare il risultato desiderato, egli non mette alla prova il *paradigma* quando fa ciò. Al contrario, rassomiglia piuttosto al giocatore di scacchi che, con un problema formulato e una scacchiera che gli sta di fronte fisicamente o mentalmente, tenta diverse mosse alternative in cerca di una soluzione. Simili tentativi, siano fatti dal giocatore di scacchi o dallo scienziato, mettono alla prova soltanto lui stesso, non le regole del gioco. Anzi, essi sono possibili solo fino a che il paradigma stesso sia assunto come valido. Perciò i paradigmi vengono sottoposti alla prova soltanto dopo che un persistente insuccesso nel risolvere un rompicapo importante ha dato origine alla crisi. E anche allora, la prova ha luogo soltanto dopo che il significato della crisi ha fatto sorgere una teoria alternativa che pone la propria candidatura a diventare paradigma. Nelle scienze, la situazione di prova non consiste mai semplicemente, come l'attività di soluzione di rompicapo, nel confronto fra un singolo paradigma e la natura. Al contrario, la verifica fa parte della competizione tra due paradigmi rivali per ottenere la fiducia della comunità scientifica.

Questa formulazione, se la si esamina da vicino, rivela somiglianze inaspettate e probabilmente importanti con due delle più popolari teorie filosofiche contemporanee concernenti la verificaione. Sono pochi ormai i filosofi della scienza che cercano ancora criteri assoluti per la verificaione di teorie scientifiche. Rendendosi conto che nessuna teoria può mai venire sottoposta a tutte le prove del caso possibili, i filosofi non chiedono se una teoria sia stata verificata, ma piuttosto se essa sia probabile alla luce dell'evidenza che effettivamente esiste. Per rispondere a tale questione, una scuola importante è arrivata a confrontare la capacità delle differenti teorie nello spiegare la prova che è a portata di mano. L'insistenza sul confronto fra teorie caratterizza anche la situazione storica in cui una nuova teoria viene accettata. Assai probabilmente essa indica una delle direzioni in cui dovranno muoversi le future discussioni concernenti la verificaione.

Nella loro forma più abituale, però, le teorie probabilistiche della verifica fanno tutte ricorso ad uno dei linguaggi di pura e neutra osservazione che abbiamo discussi nel capitolo X. Una teoria probabilistica richiede che la teoria scientifica in esame venga confrontata con tutte le altre teorie immaginabili che si adattino alla stessa collezione di dati di osservazione. Un'altra teoria chiede che si costruiscano nell'immaginazione tutte le prove concepibili cui la teoria scientifica possa essere sottoposta {129}. Sembra che una costruzione del genere sia necessaria per calcolare le probabilità specifiche, assolute o relative, ed è difficile vedere come una simile costruzione possa essere realizzata. Se, come abbiamo già sottolineato, non può esistere un sistema di linguaggio o di concetti che sia scientificamente o empiricamente neutrale, allora la proposta costruzione di prove o di teorie alternative deve derivare dall'interno di questa o di quella tradizione paradigmatica. Con queste limitazioni, non si può pensare di riuscire ad immaginare tutte le esperienze possibili e tutte le teorie possibili. Di conseguenza, le teorie probabilistiche nascondono ed illuminano al tempo stesso le condizioni della verifica. Sebbene tali condizioni dipendano, come esse sottolineano, dal confronto fra le teorie e le prove disponibili su larga scala, le teorie e le osservazioni in discussione sono sempre strettamente legate a quelle già esistenti. La verifica è come la selezione naturale: essa sceglie, fra le alternative effettive offerte da una particolare situazione storica, quelle dotate di maggior vitalità. Non serve a niente chiedersi se una tale scelta sia o no la migliore che si sarebbe potuta fare anche se fossero state disponibili altre alternative o se i dati fossero stati di un altro genere. Non esistono strumenti cui possiamo ricorrere per cercare di dare una risposta a questa domanda.

Un approccio molto diverso al complesso di questi problemi è stato sviluppato da Karl R. Popper, che nega l'esistenza di qualsiasi procedura di verifica {130}. Egli sottolinea invece l'importanza della falsificazione, cioè della prova che, avendo avuto un risultato negativo, rende necessario l'abbandono di una teoria precedentemente accettata. Si vede subito che il ruolo che viene così attribuito alla falsificazione è molto simile a quello che questo saggio assegna alle esperienze anomale, cioè alle esperienze che, suscitando una crisi, aprono la strada ad una nuova teoria. Tuttavia le esperienze anomale non possono essere identificate con

esperienze falsificanti. Dubito infatti che esperienze di quest'ultimo genere esistano. Come si è più volte messo in rilievo nelle pagine precedenti, nessuna teoria risolve mai tutti i rompicapo cui essa viene a trovarsi di fronte a un dato momento: e spesso, le soluzioni già raggiunte non sono perfette. Al contrario, è proprio l'incompletezza e l'imperfezione dell'accordo esistente tra dati e teoria che, in un dato momento, definisce molti dei rompicapo che caratterizzano la scienza normale. Se qualsiasi insuccesso nello stabilire quell'accordo dovesse essere una ragione sufficiente per abbandonare una teoria, tutte le teorie dovrebbero venire abbandonate ad ogni momento. D'altra parte, se soltanto un insuccesso clamoroso nello stabilire quell'accordo dovesse giustificare l'abbandono di una teoria, allora i popperiani esigerebbero qualche criterio di «improbabilità» o di «grado di falsificazione». Nell'elaborare un criterio del genere, essi incontrerebbero quasi certamente lo stesso complesso di difficoltà che ha perseguitato i sostenitori delle varie teorie probabilistiche di verificaione.

Molte delle difficoltà precedenti potrebbero essere evitate riconoscendo che l'errore di entrambe le opposte concezioni che oggi prevalgono circa la logica che sta alla base dell'indagine scientifica, è quello di voler comprimere due processi ben distinti fra loro in uno solo. L'esperienza anomala di Popper è importante per la scienza, perché suscita teorie che competono con il paradigma esistente. Ma la falsificazione, sebbene certamente abbia luogo, non accompagna né semplicemente è prodotto per la comparsa di un'anomalia o di un caso falsificante. Essa è invece un processo successivo e separato, che si può egualmente bene chiamare verificaione, poiché consiste nel trionfo di un nuovo paradigma su quello vecchio. Inoltre è in questo congiunto processo di verificaione e di falsificazione che il confronto probabilistico tra varie teorie svolge un ruolo centrale. Una simile formulazione a due stadi ha — penso — la virtù di essere molto verosimile, e può anche metterci in grado di cominciare a spiegare il ruolo che l'accordo (o il disaccordo) tra i fatti e la teoria svolge nel processo di verificaione. Almeno per lo storico, ha poco senso suggerire che la verificaione consiste nello stabilire raccordo tra fatti e teoria. Tutte le teorie storicamente significative si sono accordate coi fatti, ma soltanto più o meno. Non esiste una risposta precisa alla questione se o in quale misura una particolare

teoria si adatta d fatti. Però, quando le teorie vengono considerate collettivamente, o anche due a due, questioni del genere acquistano un senso. È infatti legittimo chiedersi quale di due teorie determinate e in competizione tra loro si adatta *meglio* ai fatti. Sebbene né la teoria di Priestley né quella di Lavoisier, ad esempio, si accordassero esattamente con le osservazioni esistenti, pochi contemporanei esitarono per più di dieci anni prima di concludere che la teoria di Lavoisier presentava un accordo maggiore.

Una simile formulazione, però, fa sembrare più facile e più familiare di quanto non sia in realtà il compito di scegliere tra paradigmi diversi. Se vi fosse un solo gruppo di problemi scientifici, un unico mondo entro cui operare su di essi e un solo tipo di criteri per risolverli, la competizione fra i paradigmi potrebbe essere risolta facendo ricorso a qualche semplice processo convenzionale, come quello di contare il numero di problemi risolti da ciascuna di essi. Ma, di fatto, non ci si trova mai di fronte a situazioni di questo genere. I sostenitori di paradigmi in competizione hanno sempre propositi e orientamenti almeno leggermente divergenti. Nessuna delle due diverse scuole riconoscerà come validi tutti i presupposti empirici di cui l'altra ha bisogno per sostenere la propria tesi. Come nel caso della disputa tra Proust e Berthollet a proposito della composizione dei composti chimici, esse sono destinate in parte a non comprendersi. Sebbene ciascuno possa sperare di convincere l'altro al suo mondo di considerare la scienza e i suoi problemi, nessuno dei due può sperare di dimostrare la propria tesi. La competizione tra paradigmi diversi non è una battaglia il cui esito possa essere deciso sulla base delle dimostrazioni.

Abbiamo già visto parecchie ragioni per cui i sostenitori di paradigmi in contrasto sono condannati a fallire nei loro tentativi di comprendere fino in fondo il punto di vista dell'avversario. Queste ragioni sono state globalmente descritte come incommensurabilità fra la tradizione pre-rivoluzionaria e quella post-rivoluzionaria della scienza normale; ora dovremo soltanto ricapitarle brevemente. In primo luogo, i sostenitori di paradigmi in contrasto saranno spesso in disaccordo sui problemi concreti che ogni teoria candidata a diventare paradigma dovrebbe risolvere. I loro criteri e le loro definizioni di scienza non sono gli stessi. Una teoria del movimento deve spiegare la causa

delle forze di attrazione esistenti tra le particelle di materia, oppure deve semplicemente limitarsi a constatare l'esistenza di tali forze? La dinamica di Newton venne respinta da moltissimi scienziati del tempo, perché, diversamente dalle teorie sia di Aristotele che di Cartesio, dava per scontato che si accettasse la seconda di queste due risposte. Quando perciò la teoria di Newton venne accolta, un problema era stato eliminato dalla scienza. Questo problema, tuttavia, fu uno di quelli che la teoria della relatività generale può con orgoglio pretendere di avere risolto. E ancora, quando nel XIX secolo la teoria chimica di Lavoisier si affermò e si diffuse, i chimici non poterono più porsi il problema del perché i metalli sono così simili tra loro, problema che la teoria del flogisto si era posto e che aveva risolto. Il passaggio al paradigma di Lavoisier, come il passaggio a quello di Newton, significò la rinuncia non solo a un problema ammissibile, ma anche ad una soluzione raggiunta. Tuttavia, questa rinuncia non doveva essere definitiva. Nel xx secolo riacquistarono diritto di cittadinanza nella scienza, alcuni problemi riguardanti le qualità delle sostanze chimiche e, insieme ad essi, alcune soluzioni.

In tutto ciò, tuttavia, c'è qualcosa di più della incommensurabilità dei criteri. Poiché i nuovi paradigmi sono nati da quelli vecchi, di solito essi contengono gran parte del vocabolario e dell'apparato, sia concettuale che operativo, che aveva appartenuto al paradigma tradizionale. Ma raramente essi usano questi elementi ereditati dalla tradizione in maniera del tutto tradizionale. Entro il nuovo paradigma, i vecchi termini, concetti ed esperimenti entrano in nuove relazioni tra di loro. Ne consegue inevitabilmente quello che dobbiamo chiamare, sebbene il termine non sia del tutto esatto, un'incomprensione fra le due scuole in competizione. I profani che sorridevano della teoria della relatività generale di Einstein perché lo spazio non potrebbe essere «curvo» — non si trattava propriamente di una cosa del genere — non erano semplicemente in errore. Né lo erano i matematici, i fisici e i filosofi che cercarono di elaborare una versione euclidea della teoria di Einstein {131}. Ciò che si era precedentemente inteso per spazio era necessariamente piatto, omogeneo, isotropico, e non influenzato dalla presenza della materia. Se non fosse stato così, la fisica newtoniana non avrebbe potuto funzionare. Per operare il passaggio all'universo einsteiniano, l'intera rete concettuale i cui fili sono lo spazio, il

tempo, la materia, la forza, e così via, dovette venire spostata e stesa di nuovo, in maniera diversa sulla totalità della natura. Soltanto coloro che al tempo stesso avessero compiuto e non fossero riusciti a compiere tale trasformazione, sarebbero in grado di scoprire con esattezza su che cosa sono e non sono d'accordo. La comunicazione attraverso lo spartiacque rivoluzionario è inevitabilmente parziale. Si considerino, ad esempio, coloro che diedero del matto a Copernico perché egli affermava che la terra si muoveva. È falso dire che avevano torto completamente o che avevano torto in parte. Ciò che essi indicavano col termine 'terra' era fra l'altro, la posizione stabile. La loro terra, quindi, non poteva essere mossa. D'altra parte l'innovazione di Copernico non consistette semplicemente nel far muovere la terra. Era piuttosto un modo completamente nuovo di considerare i problemi della fisica e dell'astronomia, che necessariamente cambiava il significato di entrambi i termini, 'terra' e 'moto' {132}. Senza quei cambiamenti, il concetto di terra in movimento era una pazzia. D'altro lato, una volta che tali mutamenti erano stati realizzati e compresi, sia Descartes che Huyghens poterono rendersi conto che il movimento della terra era una questione priva di contenuto per la scienza {133}.

Questi esempi ci guidano verso il terzo e più fondamentale aspetto della incommensurabilità tra paradigmi in competizione. In una maniera che sono incapace di spiegare ulteriormente, i sostenitori di paradigmi opposti praticano i loro affari in mondi differenti. L'uno contiene corpi vincolati che cadono lentamente, l'altro pendoli che ripetono il loro movimento più e più volte. In uno, le soluzioni sono composti, nel l'altro sono mescolanze. L'uno è incorporato in una matrice spaziale piatta, l'altro in una curva. Svolgendo la loro attività in mondi differenti, i due gruppi di scienziati vedono cose differenti quando guardano dallo stesso punto nella stessa direzione. Ciò però — vale la pena ripeterlo — non significa che essi possono vedere qualunque cosa piaccia loro. Entrambi guardano il mondo, e ciò che guardano non cambia. Ma in alcune aree essi vedono cose differenti, e le vedono in differenti relazioni tra loro. Questa è la ragione per cui può accadere che una legge, che neanche se fosse dimostrata riuscirebbe a convincere un gruppo di scienziati, può sembrare intuitivamente ovvia ad un altro gruppo. Per la stessa ragione, prima che possano sperare di comunicare completamente, uno dei due gruppi deve

fare l'esperienza di quella conversione che abbiamo chiamato spostamento di paradigma. Proprio perché è un passaggio tra incommensurabili, il passaggio da un paradigma ad uno opposto non può essere realizzato con un passo alla volta, né imposto dalla logica o da un'esperienza neutrale. Come il riorientamento gestaltico, esso deve compiersi tutto in una volta (sebbene non necessariamente in un istante) oppure non si compirà affatto.

Ma allora, come vengono indotti gli scienziati a realizzare questo passaggio? In parte, la risposta è che molto spesso essi non si lasciano affatto convincere a farlo. Il copernicanesimo convertì pochi scienziati per quasi un secolo dopo la morte di Copernico. L'opera di Newton non fu accettata da molti, particolarmente sul continente, per più di mezzo secolo dopo l'apparizione dei *Principia* {134}. Priestley non accettò mai la teoria dell'ossigeno, né Lord Kelvin la teoria elettromagnetica, e così via. Le difficoltà di una conversione sono state spesso riscontrate dagli stessi scienziati. Darwin, in un passo particolarmente illuminante alla fine dell'*Origine delle specie*, scrisse: «Sebbene sia completamente convinto della verità delle idee presentate in questo volume... non mi aspetto affatto di convincere gli sperimentati naturalisti, la cui mente è affollata da una moltitudine di fatti considerati tutti, per un lungo periodo di anni, da un punto di vista diametralmente opposto al mio. Ma guardo con fiducia all'avvenire, ai giovani naturalisti che stanno nascendo, i quali saranno capaci di considerare con imparzialità entrambi i lati della questione» {135}. E Max Planck, ripercorrendo la propria carriera nella sua *Autobiografia scientifica*, osservò con tristezza che «una nuova verità scientifica non trionfa convincendo i suoi oppositori e facendo loro vedere la luce, ma piuttosto perché i suoi oppositori alla fine muoiono, e cresce una nuova generazione che è abituata ad essa» {136}.

Questi e altri simili fatti sono troppo noti per richiedere che li si sottolinei ulteriormente. Ma essi esigono una nuova valutazione. In passato sono stati spesso considerati come indicazione della difficoltà che gli scienziati, essendo soltanto uomini, trovano ad ammettere i loro errori, anche quando vengono messi di fronte a una prova stringente. Io vorrei piuttosto sostenere la tesi che, in casi come questi, non si tratta né di prova né di errore. Il trasferimento della fiducia da un paradigma ad un altro è un'esperienza di conversione che non può essere imposta con la

forza. Una resistenza opposta per tutta la vita, particolarmente da parte di coloro la cui carriera produttiva è stata legata alla vecchia tradizione della scienza normale, non è una violazione dei criteri scientifici, ma una indicazione della natura stessa della ricerca scientifica. La ragione di resistenza è costituita dalla sicurezza che il vecchio paradigma finirà col risolvere tutti i suoi problemi, che la natura può essere forzata entro le incasellature fomite dal paradigma. Inevitabilmente, in tempi di rivoluzione, una simile sicurezza sembra ostinata e cocciuta, e talvolta lo diventa davvero. Ma essa è anche qualcosa d'altro. Quella stessa sicurezza è ciò che rende possibile la scienza normale, basata sulla soluzione di rompicapo. Ed è soltanto attraverso la scienza normale che la comunità degli specialisti riesce, dapprima, a sfruttare ciò che può offrire per prospettive e per il vecchio paradigma, e, quindi, ad individuare le difficoltà, dallo studio delle quali può sorgere un nuovo paradigma.

Tuttavia, dire che la resistenza è inevitabile e legittima, e che un mutamento di paradigma non può essere giustificato per mezzo di prove non equivale a dire che nessuna argomentazione può servire o che gli scienziati non possono venire persuasi a cambiare le loro idee. Sebbene si richieda spesso una generazione per effettuare il mutamento, le comunità scientifiche sono state convertite più volte a nuovi paradigmi. Inoltre, tali conversioni avvengono non malgrado il fatto che gli scienziati siano esseri umani, ma proprio perché lo sono. Sebbene alcuni scienziati, particolarmente quelli più vecchi e con maggiore esperienza, possano resistere indefinitamente, la maggior parte degli altri possono venire convinti in una maniera o nell'altra. Le conversioni avranno luogo poche alla volta finché, dopo la morte degli ultimi oppositori, l'intera comunità degli scienziati di professione si troverà ancora a svolgere la propria attività sotto la guida di un unico paradigma, ma si tratterà ora di un paradigma differente. Dobbiamo perciò chiederci come si ottiene una conversione e quali resistenze essa incontra.

Che genere di risposta possiamo aspettarci per una simile domanda? Proprio perché investe le tecniche di persuasione e le argomentazioni pro e contro in una situazione in cui non vi può essere nessuna prova, il nostro problema è nuovo, e richiede un genere di studio che non è stato precedentemente affrontato. Dovremo accontentarci di un esame molto parziale e

approssimativo. Vedremo così che dal risultato di questo esame e insieme da ciò che abbiamo già detto prima possiamo concludere che il problema della natura dell'argomentazione scientifica, se si considera il suo aspetto di persuasione piuttosto che quello di prova, non può essere risolto con una risposta unica e uniforme. I singoli scienziati abbracciano un nuovo paradigma per ogni genere di ragioni, e di solito per parecchie ragioni allo stesso tempo. Alcune di queste ragioni — ad esempio, il culto del sole che contribuì a convertire Keplero al copernicanesimo — si trovano completamente al di fuori della sfera della scienza {137}. Altre ragioni possono dipendere da idiosincrasie autobiografiche e personali. Persino la nazionalità o la precedente reputazione dell'innovatore e dei suoi maestri può talvolta svolgere una funzione importante {138}. In definitiva, perciò, dobbiamo abituarci a porre tale domanda in termini differenti. Il nostro interesse sarà allora rivolto non alle argomentazioni che di fatto convertono questo o quel singolo individuo, ma piuttosto al genere di comunità che, presto o tardi, finisce sempre col ricostituirsi come un unico gruppo. Rinvio però questo problema al capitolo finale; nel frattempo esamino alcuni tipi di argomentazioni che si dimostrano particolarmente efficaci nelle dispute concernenti mutamenti di paradigma.

Probabilmente la pretesa più importante avanzata dai sostenitori di un nuovo paradigma è quella di essere in grado di risolvere i problemi che hanno portato il vecchio paradigma alla crisi. Questa pretesa, quando può venire avanzata legittimamente, costituisce spesso l'argomentazione a favore più efficace. Nel settore nel quale tale pretesa viene avanzata, il paradigma è notoriamente in difficoltà. Su queste difficoltà si è indagato a lungo, ed ogni tentativo per risolverle si è dimostrato sempre vano. «Esperimenti cruciali» — cioè esperimenti capaci di operare una discriminazione particolarmente netta fra i due paradigmi — sono stati riconosciuti ed attestati addirittura prima che il nuovo paradigma venisse inventato. così Copernico affermava di avere risolto il problema lungamente dibattuto della lunghezza dell'anno solare, Newton di aver riconciliato la meccanica terrestre con quella celeste, Lavoisier di aver risolto i problemi dell'identità dei gas e dei rapporti ponderali, ed Einstein di aver reso l'elettrodinamica compatibile con una scienza del moto rivista.

Affermazioni di questo genere hanno larga probabilità di

essere accettate, se il nuovo paradigma presenta una precisione quantitativa notevolmente migliore di quella del suo avversario. La superiorità quantitativa delle tavole rudolfine di Keplero rispetto a tutte quelle calcolate sulla base della teoria tolemaica fu uno dei fattori più importanti nella conversione degli astronomi al copernicanesimo. Il successo riportato da Newton nel prevedere alcuni fenomeni astronomici sotto l'aspetto quantitativo fu probabilmente l'unica ragione veramente importante per il trionfo della sua teoria su altre teorie avversarie, le quali erano più ragionevoli ma sempre solo qualitative. E nel nostro secolo, la notevole capacità di previsione quantitativa sia della legge della radiazione di Plank che dell'atomo di Bohr persuasero rapidamente molti fisici ad adottarli, anche se, considerando la scienza fisica nel suo complesso, entrambi questi contributi crearono molti più problemi di quanti ne risolsero {139}.

La pretesa di avere risolto i problemi che hanno provocato la crisi è però difficilmente sufficiente da sola. Né è sempre possibile avanzarla legittimamente. Di fatto, la teoria di Copernico non era più accurata di quella di Tolomeo e non introdusse nessun immediato miglioramento nel calendario. O, per fare un altro esempio, la teoria ondulatoria della luce, per alcuni anni dopo che era stata annunciata, ebbe addirittura minor successo della rivale teoria corpuscolare nel risolvere gli effetti della polarizzazione che erano una delle cause principali della crisi nel campo dell'ottica. Talvolta l'attività più libera che caratterizza la ricerca straordinaria produrrà una teoria adatta ad essere candidata al ruolo di paradigma che inizialmente non è di alcun aiuto per i problemi che hanno suscitato la crisi. Quando si presenta una situazione del genere, le prove a favore debbono essere ricavate da altri settori del campo. In questi altri settori si possono sviluppare argomentazioni particolarmente persuasive, nel caso in cui il nuovo paradigma permette la previsione di fenomeni che non si erano mai neppure sospettati quando prevaleva il vecchio paradigma.

La teoria di Copernico, ad esempio, suggeriva che i pianeti dovevano essere simili alla terra, che Venere doveva presentare fasi, e che l'universo doveva essere molto più largo di quanto si era supposto in precedenza. Di conseguenza, quando, sessantanni dopo la sua morte, il telescopio rivelò improvvisamente l'esistenza di montagne sulla luna, le fasi di Venere, e un numero immenso di

stelle che prima non si erano sospettate, queste osservazioni convertirono alla nuova teoria numerosi scienziati, particolarmente fra coloro che non erano astronomi {140}. Nel caso della teoria ondulatoria, una delle cause principali della conversione degli specialisti fu ancor più drammatica. La resistenza francese crollò improvvisamente e in maniera relativamente completa quando Fresnel fu in grado di dimostrare l'esistenza di una macchiolina bianca al centro dell'ombra di un disco circolare. Questo era un effetto che neppure lui aveva previsto, ma che Poisson, che all'inizio era stato uno dei suoi oppositori, aveva dimostrato essere una necessaria, anche se assurda, conseguenza della teoria di Fresnel {141}. Argomentazioni come queste si dimostrarono particolarmente persuasive sia a causa della forte impressione che suscitano, sia anche perché non sono costruite all'interno della nuova teoria fin dall'inizio. E talvolta questa forza esterna può essere sfruttata anche se il fenomeno in questione era stato osservato molto tempo prima che fosse introdotta per la prima volta la teoria che ne offre una spiegazione. Ad esempio, sembra che Einstein non avesse previsto che la relatività generale avrebbe risolto con precisione la ben nota anomalia riscontrata nel moto del perielio di Mercurio, e quando questa soluzione fu trovata, egli conobbe il trionfo che gli spettava {142}.

Tutte le argomentazioni a favore di un paradigma che sono state discusse sin qui erano basate sul confronto della capacità dei paradigmi rivali a risolvere problemi. Per gli scienziati, argomentazioni di questo genere sono di solito le più importanti e le più persuasive. Gli esempi precedenti non dovrebbero lasciare dubbi sulla causa del loro straordinario richiamo. Ma per ragioni sulle quali ritorneremo tra breve, esse non sono costrittive né per gli individui né per le comunità. Per fortuna v'è un altro genere di considerazioni che può indurre uno scienziato ad abbandonare un vecchio paradigma a favore di uno nuovo. Si tratta delle argomentazioni, che di rado sono del tutto esplicite, che fanno appello alla sensibilità dell'individuo per ciò che è appropriato o presenta un aspetto esteticamente attraente: la nuova teoria viene presentata come «più elegante», «più adatta», o «più semplice» della vecchia. Probabilmente argomentazioni di questo genere sono più efficaci nella matematica che nelle altre scienze. Le prime versioni della maggior parte dei nuovi paradigmi sono grezze.

Prima che la loro forza d'attrazione estetica possa svilupparsi completamente, la grande maggioranza della comunità scientifica è già stata persuasa con altri mezzi. Nondimeno, l'importanza delle considerazioni estetiche talvolta può essere decisiva. Sebbene tali considerazioni spesso attraggano soltanto pochi scienziati verso una nuova teoria, proprio da questi pochi può dipendere il suo trionfo finale. Se essi non lo avessero rapidamente accettato per ragioni eminentemente personali, il nuovo candidato alla funzione di paradigma avrebbe potuto non venire mai sufficientemente elaborato fino ad ottenere la fiducia della comunità scientifica nel suo complesso.

Per renderci conto dell'importanza di simili considerazioni più soggettive e di natura estetica, si ricordi qual è l'oggetto di una disputa concernente paradigmi. Quando un nuovo candidato alla funzione di paradigma viene avanzato per la prima volta, esso è spesso riuscito a risolvere soltanto pochi dei problemi che gli stanno di fronte, e la maggior parte delle soluzioni sono ancora lontane dall'essere perfette. Fino a Keplero, la teoria copernicana aveva portato ben pochi miglioramenti alle previsioni sulla posizione dei pianeti fatte sulla base della teoria tolemaica. Quando Lavoisier vide l'ossigeno come nient'altro che «l'aria stessa», la sua nuova teoria non poteva minimamente far fronte ai problemi sollevati dalla proliferazione di nuovi gas, un punto questo sottolineato con forza e con successo da Priestley nel suo contro attacco. Casi come quello della macchia bianca di Fresnel sono estremamente rari. Di solito è soltanto molto più tardi, dopo che il nuovo paradigma è stato ulteriormente elaborato, accettato, e sfruttato, che compaiono argomentazioni che appaiono decisive: per esempio, il pendolo di Foucault per dimostrare la rotazione della terra, o l'esperimento di Fizeau per dimostrare che la velocità della luce è maggiore nell'aria che nell'acqua. Produrle fa parte dei compiti della scienza normale, e la loro funzione non si esercita nel dibattito sui paradigmi, ma nei testi post rivoluzionari.

Prima che questi testi siano scritti, mentre il dibattito ancora continua, la situazione è molto differente. Di solito, gli oppositori di un paradigma nuovo possono dichiarare con ragione che persino nell'area della crisi esso è superiore soltanto di poco al suo rivale tradizionale. Naturalmente, esso permette di affrontare meglio certi problemi e mette in luce nuove regolarità. Ma si può presumere che il vecchio paradigma sia in grado di essere

articolato per venire incontro a queste difficoltà allo stesso modo che esso aveva affrontato altre difficoltà in un periodo precedente. Sia il sistema astronomico geocentrico di Tycho Brahe che le versioni più tarde della teoria del flogisto costituivano tentativi di rispondere alla sfida lanciata da un nuovo candidato alla funzione di paradigma, e sia l'uno che le altre riportarono un successo soddisfacente {143}. Inoltre, i sostenitori della teoria e dei procedimenti tradizionali possono quasi sempre richiamare l'attenzione sui problemi che il suo nuovo rivale non ha risolto, ma che, dal loro punto di vista, non sono affatto problemi. Fino a che non venne scoperta la composizione dell'acqua, la combustione dell'idrogeno costituì una valida argomentazione a favore della teoria del flogisto e contro quella di Lavoisier. E dopo che la teoria dell'ossigeno si fu affermata, essa non riusciva ancora a spiegare la preparazione di un gas combustibile a partire dal carbone, fenomeno questo su cui i teorici del flogisto avevano posto l'accento, considerandolo un forte sostegno della loro concezione {144}. Persino entro l'area della crisi, le argomentazioni a favore e contro possono talvolta quasi equilibrarsi. E al di fuori dell'area della crisi, la bilancia pende spesso decisamente a favore della tradizione. Copernico distrusse una secolare spiegazione del moto terrestre senza offrire nulla che la sostituisse; Newton fece lo stesso per una spiegazione più antica della gravità; Lavoisier per le proprietà comuni dei metalli, e così via. In breve, se un nuovo candidato alla funzione di paradigma dovesse essere giudicato fin dall'inizio soltanto dal rigido punto di vista della sua relativa capacità nel risolvere problemi, le scienze subirebbero un numero molto minore di rivoluzioni fondamentali. E se a ciò si aggiungessero le contro-argomentazioni prodotte da quella che abbiamo precedentemente chiamata la incommensurabilità dei paradigmi, nelle scienze non avverrebbero rivoluzioni.

Ma nei dibattiti sui paradigmi non si discutono realmente le relative capacità nel risolvere i problemi, sebbene, per buone ragioni, vengano adoperati di solito termini che vi si riferiscono. Il punto in discussione consiste invece nel decidere quale paradigma debba guidare la ricerca in futuro, su problemi molti dei quali nessuno dei due competitori può ancora pretendere di risolvere completamente. Bisogna decidere tra forme alternative di fare attività scientifica e, date le circostanze, una tale decisione deve essere basata più sulle promesse future che sulle conquiste

passate. Colui che abbraccia un nuovo paradigma fin dall'inizio, lo fa spesso a dispetto delle prove fomite dalla soluzione di problemi. Egli deve, cioè, aver fiducia che il nuovo paradigma riuscirà in futuro a risolvere i molti vasti problemi che gli stanno davanti, sapendo soltanto che il vecchio paradigma non è riuscito a risolverne alcuni. Una decisione di tal genere può essere presa soltanto sulla base della fede.

Questa è una delle ragioni per cui la crisi che precede si dimostra così importante. Gli scienziati che non ne hanno fatto esperienza difficilmente rinunceranno alla prova convincente fornita dalla capacità di risolvere problemi, per seguire ciò che può facilmente dimostrarsi, e sarà largamente considerato come un fuoco fatuo. Ma la crisi da sola non è sufficiente. Vi deve anche essere un qualche fondamento, sebbene non necessariamente razionale e neppure in ultima analisi necessariamente corretto, che giustifichi la fiducia nel particolare candidato scelto. Vi deve essere qualcosa che dia, almeno a pochi scienziati, la sensazione che la nuova proposta è sulla strada giusta, e talvolta sono semplicemente considerazioni personali o considerazioni estetiche inarticolate che possono avere questo effetto. Considerazioni di questo genere hanno spesso convertito gli scienziati in momenti in cui la maggior parte delle argomentazioni tecniche articolate indirizzavano su un'altra strada. Quando furono introdotte per la prima volta, né la teoria astronomica copernicana né la teoria della materia di De Broglie presentavano molti altri importanti motivi di attrazione. Persino oggi, la teoria generale di Einstein attrae gli scienziati principalmente per ragioni estetiche che, un potere di attrazione questo che pochi, al di fuori del campo della matematica, sono riusciti a sentire.

Con questo non voglio suggerire l'idea che il nuovo paradigma alla fine trionfa attraverso qualche forma di estetica mistica. Al contrario, pochissimi abbandonano una tradizione soltanto per queste ragioni. E a quelli che lo fanno capita spesso di ritrovarsi sulla strada sbagliata. Ma perché un paradigma possa trionfare, deve conquistare prima alcuni sostenitori, che lo svilupperanno fino ad un punto in cui molte solide argomentazioni potranno venire prodotte e moltiplicate. Ma anche queste argomentazioni, quando ci sono, non sono individualmente decisive. Dal momento che gli scienziati sono uomini ragionevoli, l'una o l'altra argomentazione finirà per persuaderne molti. Ma non v'è nessuna

singola argomentazione che possa, o debba, persuaderli tutti. Ciò che si verifica non è tanto una unica conversione di gruppo, quanto un progressivo spostamento della distribuzione della fiducia degli specialisti.

All'inizio un nuovo candidato alla funzione di paradigma può avere pochi sostenitori, e in qualche occasione le motivazioni che stanno dietro ai sostenitori possono essere sospette. Tuttavia, se i sostenitori sono competenti, perfezioneranno il paradigma, ne esploreranno le possibilità e mostreranno che cosa significa appartenere alla comunità guidata da esso. Procedendo così le cose, se il paradigma è uno di quelli destinati ad imporsi, il numero e la forza delle argomentazioni a suo favore aumenteranno. Altri scienziati verranno allora convertiti, e così si intensificherà il lavoro di esplorazione del nuovo paradigma. Gradualmente il numero degli esperimenti, degli strumenti, degli articoli, dei libri basati sul paradigma si andrà moltiplicando. Un numero sempre maggiore di scienziati convinti della fecondità della nuova concezione, adotteranno il nuovo modo di praticare la scienza normale, fino a che alla fine restano soltanto pochi a resistere sulle vecchie posizioni. Ma neppure di costoro possiamo dire che sono dalla parte dell'errore. Sebbene lo storico può sempre trovare uomini — Priestley, ad esempio — che furono irragionevoli a resistere tanto a lungo, non troverà un punto ove la resistenza diventa illogica o antiscientifica. Al più, può affermare che colui che continua a resistere anche dopo che l'intera comunità di specialisti cui appartiene è stata convertita, ha cessato *ipso facto* di essere uno scienziato.

Capitolo tredicesimo.

Progresso attraverso le rivoluzioni

Nelle pagine precedenti è stata presentata una descrizione schematica dello sviluppo scientifico nei limiti consentiti da questo saggio. Tuttavia non siamo arrivati ad una vera conclusione. Se questa descrizione è in qualche modo riuscita a cogliere la struttura essenziale della continua evoluzione di una scienza, essa avrà posto al tempo stesso un problema specifico: Perché l'impresa scientifica che abbiamo tratteggiato sopra, dovrebbe muoversi costantemente avanti, diversamente da quanto fanno l'arte, la teoria politica, o la filosofia? Perché il progresso è una prerogativa riservata quasi esclusivamente al genere di attività che chiamiamo scienza? L'insieme di questo saggio ha respinto le risposte che vengono solitamente date a tale domanda. Dobbiamo perciò concludere la nostra discussione chiedendoci se sia possibile trovare una risposta alternativa.

Si noti subito che parte della domanda è interamente semantica. In misura molto notevole, il termine 'scienza' è riservato a campi che progrediscono in maniera evidente. Ciò appare più che mai chiaro nei ricorrenti dibattiti circa la questione se l'una o l'altra delle scienze sociali contemporanee sia realmente una scienza. Questi dibattiti presentano un'analogia con quelli che avvennero nei periodi pre-paradigmatici in campi che oggi vengono senza esitazione etichettati come scienza. Apparentemente l'intera questione si riduce a quella della definizione di un termine così dibattuto. Alcuni sostengono che la psicologia, ad esempio, è una scienza perché possiede tali e tal'altre caratteristiche. Altri obiettano che simili caratteristiche non sono né necessarie né sufficienti a far sì che un campo di studio diventi una scienza. Spesso si spendono grandi energie e si

suscitano forti passioni; e chi è estraneo al problema non riesce a capirne il perché. È possibile che una definizione di 'scienza' possa essere così importante? È possibile che sia sulla base di una *definizione* che un uomo riesce a sapere se è o non è uno scienziato? Se è così, perché i cultori di scienze naturali o gli artisti non si preoccupano della definizione del termine? È inevitabile nutrire il sospetto che il punto in discussione sia più fondamentale. È probabile che ciò che realmente ci si domanda consista in questioni come le seguenti: Perché il mio campo non riesce ad avanzare come fa, ad esempio, la fisica? Quali mutamenti tecnici, metodologici o ideologici potrebbero metterlo in grado di far ciò? Queste non sono, però, questioni che potrebbero venire risolte con un accordo sulla definizione. Inoltre, se il precedente delle scienze naturali può essere di qualche utilità, esse cesseranno di essere una fonte di preoccupazione non quando verrà trovata una definizione, ma quando i gruppi, che ora dubitano del loro stato, raggiungeranno un consenso a proposito delle loro conquiste passate e presenti. Può essere significativo, per esempio, il fatto che gli economisti discutano meno circa la questione se il loro campo sia o no una scienza di quanto facciano coloro che lavorano in altri campi delle scienze sociali. Questo è dovuto al fatto che gli economisti sanno che cos'è la scienza? O non piuttosto al fatto che sono d'accordo su che cos'è l'economia?

Questo aspetto del problema ha il suo rovescio che, sebbene non più semplicemente semantico, può aiutare a mettere in luce le inestricabili connessioni tra le nostre nozioni di scienza e di progresso. Per molti secoli, sia nell'antichità che nei primi secoli della moderna civiltà europea, la pittura era stata considerata come *la* disciplina cumulativa per eccellenza. In quei periodi si riteneva che il compito dell'artista fosse quello di rappresentare. Critici e storici, come Plinio e Vasari, registrarono con venerazione la serie di invenzioni, dallo scorcio al chiaroscuro, che avevano reso possibili rappresentazioni della natura sempre più perfette {145}. Ma quelli sono anche i periodi, specialmente il Rinascimento, in cui il distacco tra le arti e le scienze era sentito molto poco. Leonardo non era che uno fra i tanti che si muovevano liberamente avanti e indietro in campi che soltanto più tardi diventarono categoricamente distinti {146}. Inoltre, anche dopo che questo libero movimento e questo continuo scambio furono cessati, il termine 'arte' continuò ad essere applicato tanto

alla tecnologia, quanto a pratiche, anch'esse considerate progressive, quali la pittura e la scultura. Soltanto quando queste ultime rinunciarono definitivamente ad avere come scopo la rappresentazione e cominciarono a ricercare un insegnamento nei modelli primitivi, il distacco che oggi ci appare naturale assunse la sua attuale profondità. E perfino oggi, parte della nostra difficoltà a vedere le profonde differenze esistenti tra la scienza e la tecnica deve essere attribuita al fatto che il progresso ci appare come un attributo di entrambi.

Questo però può soltanto chiarire, non risolvere, la nostra attuale difficoltà a riconoscere che tendiamo a considerare scienza ogni campo in cui il progresso è notevole. Resta il problema di intendere perché il progresso debba essere una caratteristica così importante di un'impresa condotta con le tecniche e le finalità che questo saggio ha descritte. Questo problema in realtà contiene in sé altri problemi, e noi dovremo considerarli ciascuno separatamente. In tutti i casi tranne l'ultimo, però, la loro soluzione dipenderà in parte da un rovesciamento della nostra concezione normale del rapporto tra l'attività scientifica e la comunità che la pratica. Dobbiamo cioè imparare a riconoscere come cause quelli che sono stati di solito considerati come effetti. Se possiamo operare un simile rovesciamento, le espressioni 'progresso scientifico' e persino 'oggettività scientifica' possono finire col sembrare in parte ridondanti. Di fatto, un aspetto della ridondanza è già stato illustrato. Un campo fa progressi perché è una scienza, oppure è una scienza perché fa progressi?

Chiediamoci ora perché un'impresa come la scienza «normale» debba progredire, e cominciamo col ricordare alcune fra le sue caratteristiche più salienti. Normalmente, i membri di una corporazione scientifica matura operano sulla base di un unico paradigma o di un insieme di paradigmi strettamente collegati tra loro. È assai raro che corporazioni scientifiche diverse si occupino degli stessi problemi. In simili casi eccezionali, i gruppi hanno in comune parecchi paradigmi fondamentali. Considerato però dall'interno di un'unica corporazione sia essa composta di scienziati o di non-scienziati, il risultato del lavoro creativo riuscito è il progresso. Come potrebbe essere qualcos'altro? Abbiamo appena notato ad esempio che, quando gli artisti consideravano la rappresentazione come loro scopo, i critici e gli storici facevano la cronistoria del progresso del gruppo che appariva unito. Altri

campi creativi presentano un progresso dello stesso genere. Il teologo che articola il dogma, o il filosofo che raffina gli imperativi kantiani, contribuiscono al progresso, se non altro a quello del gruppo che ne condivide le premesse. Nessuna scuola creativa riconosce una categoria di opere che sia un successo creativo, ma non sia, nello stesso tempo, un contributo alle conquiste collettive del gruppo. Se dubitiamo, come molti fanno, che campi non-scientifici facciano progressi, ciò non può dipendere dal fatto che le singole scuole non ne facciano alcuno. Piuttosto, la ragione è che esistono sempre scuole in competizione tra loro, ciascuna delle quali mette costantemente in discussione i fondamenti stessi delle altre. Colui che sostiene che la filosofia, ad esempio, non ha fatto progressi, vuole mettere in rilievo il fatto che vi sono ancora aristotelici, non che l'aristotelismo non sia riuscito a progredire.

Questi dubbi circa il progresso nascono, però, anche nelle scienze. Per tutto il periodo pre-paradigmatico, quando esiste una moltitudine di scuole in competizione tra loro, è difficile trovare una prova del progresso, tranne che all'interno delle singole scuole. Questo è il periodo descritto nel capitolo II come quello durante il quale singoli individui praticano la scienza, ma in cui i risultati della loro attività non costituiscono contributi alla scienza quale noi la conosciamo. Ed ancora, durante i periodi di rivoluzione, quando le dottrine fondamentali di un campo sono ancora una volta in discussione, vengono ripetutamente avanzati dubbi sulla possibilità di una continuazione del progresso qualora venga adottato questo o quello dei paradigmi che si fronteggiano. Coloro che rifiutavano il newtonianesimo proclamavano che la sua fiducia nelle forze innate avrebbe ricondotto la scienza ad epoche di oscurantismo. Quelli che si opponevano alla chimica di Lavoisier sostenevano che l'abbandono dei «principi» chimici a favore degli elementi di laboratorio equivaleva all'abbandono di una spiegazione chimica ormai raggiunta per rifugiarsi in un mero nome. Un sentimento analogo, sebbene espresso con maggiore moderazione, sembra stare al fondo dell'opposizione di Einstein, di Bohr e di altri, alla dominante interpretazione probabilistica della meccanica quantistica. In breve, è soltanto durante i periodi di scienza «normale» che il progresso sembra evidente e sicuro. Durante questi periodi, però, la corporazione scientifica non potrebbe considerare in altra maniera i frutti del proprio lavoro.

Per quanto riguarda la scienza normale, dunque, parte della

risposta al problema del progresso risiede semplicemente nel punto di vista dell'osservatore. Il progresso scientifico non è di genere diverso da quello del progresso in altri campi, ma l'assenza per la maggior parte del tempo di scuole in competizione tra loro, ognuna delle quali metta in discussione gli scopi e i criteri delle altre, fa sì che il progresso di una corporazione governata dalla scienza normale sia più facile da vedere. Questa è, però, soltanto una parte della risposta e neppure la più importante. Abbiamo già notato per esempio che, una volta che l'accettazione di un paradigma comune ha liberato la comunità scientifica dalla necessità di riesaminare costantemente i suoi principi fondamentali, i membri della comunità possono concentrarsi esclusivamente sui fenomeni più sottili ed esoterici che il paradigma mette in luce. Inevitabilmente, ciò accresce l'efficienza e l'efficacia con cui il gruppo nella sua totalità risolve nuovi problemi. Altri aspetti della vita professionale all'interno della scienza intensificano ancora di più questa efficienza specifica.

Fra questi ci sono le conseguenze dell'isolamento senza eguali che una comunità scientifica matura mantiene rispetto che richieste del mondo dei profani e della vita d'ogni giorno. Un tale isolamento non è mai stato completo; ciò che d'interesse qui è una questione di grado. Nondimeno, non esistono altre corporazioni professionali in cui l'opera creativa dell'individuo sia così esclusivamente rivolta agli altri membri della stessa professione dai quali esclusivamente verrà valutata. Il più esoterico dei poeti o il più astratto dei teologi è molto più interessato di quanto lo sia lo scienziato all'approvazione della sua opera creativa da parte dell'uomo comune, sebbene possa ancora meno interessarsi all'approvazione in generale. Tale differenza si dimostra ricca di importanti conseguenze. Proprio perché lavora soltanto per un pubblico di colleghi, un pubblico che condivide i suoi valori e le sue convinzioni, lo scienziato può affidarsi ad un unico insieme di criteri. Egli non deve preoccuparsi di quello che può pensare un altro gruppo o un'altra scuola, e può perciò sbarazzarsi di un problema e passare ad un altro più rapidamente di quanto possano fare coloro che lavorano per un pubblico molto più eterodosso. Cosa ancor più importante, l'isolamento della comunità scientifica dalla società permette al singolo scienziato di concentrare la propria attenzione su problemi per i quali ha buone ragioni di credere che sarà in grado di trovare la soluzione. Diversamente

dagli ingegneri, da molti medici e dalla maggior parte dei teologi, lo scienziato non è costretto a scegliere dei problemi perché essi esigono urgentemente una soluzione e senza tenere in considerazione gli strumenti disponibili per risolverli. Sotto questo aspetto, il contrasto tra i cultori delle scienze naturali e quelli di molte scienze sociali si dimostra istruttivo. Questi ultimi spesso tendono, mentre i primi non fanno quasi mai, a difendere la loro scelta di un problema di ricerca — ad esempio, gli effetti della discriminazione razziale o le cause del ciclo degli affari — principalmente nei termini dell'importanza sociale che avrebbe il raggiungimento di una soluzione. In queste condizioni, quale altro gruppo potrebbe risolvere i suoi problemi ad un ritmo più rapido?

Gli effetti dell'isolamento dalla società sono resi notevolmente più forti da un'altra caratteristica presentata dalla corporazione scientifica specialistica: il tipo di educazione che costituisce una iniziazione. Nel campo della musica, delle arti grafiche e della letteratura, colui che vi svolge attività forma la propria educazione venendo a contatto con le opere di altri artisti, principalmente di quelli dei periodi precedenti. I trattati, fatta eccezione per i compendi di creazioni originali e per i manuali che preparano alla loro lettura, hanno soltanto un'importanza secondaria. Nella storia, nella filosofia e nelle scienze sociali, i trattati hanno un'importanza maggiore. Ma anche in questi campi, il corso universitario di base richiede, oltre lo studio dei manuali, la lettura di fonti originali, alcune delle quali sono i «classici» del campo, altre sono i risultati della ricerca contemporanea che gli specialisti del campo espongono gli uni per gli altri. Di conseguenza, lo studente di ciascuna di queste discipline è costantemente informato dell'immensa varietà di problemi che i membri del gruppo cui apparterrà in futuro hanno tentato di risolvere nel corso del tempo. Cosa ancor più importante, egli ha costantemente davanti a sé numerose soluzioni contrastanti ed incommensurabili di questi problemi, soluzioni che egli deve, in ultima istanza, giudicare e valutare da sé.

Si confronti questa situazione con quella delle scienze naturali contemporanee. In questi campi lo studente impara principalmente dai manuali finché, nel terzo o quarto anno della sua carriera universitaria, comincia a fare ricerche originali per proprio conto. Molti curricula scientifici non richiedono neppure a studenti di corsi postuniversitari di leggere opere che non siano

state scritte espressamente per studenti.

I rari professori che consigliano letture supplementari di articoli o monografie di ricerca, si limitano a farlo nei corsi più avanzati e per materiali che cominciano più o meno là ove i trattati disponibili finiscono. Fino agli ultimi stadi dell'educazione di uno scienziato, i manuali sostituiscono sistematicamente la letteratura scientifica creativa che li ha resi possibili. Data la fiducia nei loro paradigmi, che rende possibile questa tecnica educativa, pochi scienziati desidererebbero cambiarla. Perché, dopotutto, lo studente di fisica dovrebbe leggere, ad esempio, le opere di Newton, Faraday, Einstein, o Schrodinger, dal momento che tutto quello che ha bisogno di conoscere su queste opere è ricapitolato in una forma molto più breve, più precisa e più sistematica in numerosi manuali aggiornati?

Senza voler difendere le estreme conseguenze cui questo tipo di educazione è stato spinto talvolta, non si può fare a meno di constatare che esso è stato, in generale, straordinariamente efficace. Naturalmente si tratta di un'educazione rigida e limitata, forse più rigida e limitata di ogni altro tipo di educazione, fatta eccezione per la teologia ortodossa. Ma per la ricerca all'interno della scienza normale, per risolvere rompicapo all'interno della tradizione definita dai manuali, lo scienziato viene preparato quasi alla perfezione. Inoltre egli è ben preparato anche per altri compiti ancora, come quelli derivanti dal prodursi di crisi significative nella scienza normale. Quando sorgono crisi di questo genere, lo scienziato non è, naturalmente, preparato altrettanto bene. Anche se le crisi prolungate si riflettono probabilmente in una prassi educativa meno rigida, l'addestramento scientifico non è il più adeguato a produrre colui che scoprirà facilmente un nuovo approccio. Ma fino a che non compare qualcuno a presentare una teoria adatta ad essere candidata alla funzione di paradigma — di solito un giovane o un neofita del campo — la perdita dovuta alla rigidità dipende soltanto dall'individuo. Data una generazione in cui effettuare il mutamento, la rigidità individuale è compatibile con una comunità che può spostarsi da un paradigma all'altro quando lo richiedono le circostanze. In particolare è compatibile quando quella stessa rigidità fornisce alla comunità una indicazione che qualcosa non funziona.

Nel suo stato normale, allora, la comunità scientifica è uno strumento straordinariamente efficace per risolvere i problemi e i

rompicapo definiti dal suo paradigma. Inoltre, il risultato dovuto alla soluzione di questi problemi deve inevitabilmente essere progresso. Non c'è in questo nessun problema. Rendersi conto di ciò, tuttavia, ci aiuta soltanto a mettere in luce i tratti salienti del secondo aspetto del problema che riguarda il progresso nelle scienze. Volgiamo perciò la nostra attenzione su questo aspetto del problema e chiediamoci che cos'è il progresso nella scienza straordinaria. Perché il progresso dovrebbe accompagnare sempre anche le rivoluzioni scientifiche? Ancora una volta, possiamo imparare molte cose se ci chiederemo che cos'altro potrebbe essere il risultato di una rivoluzione scientifica. Le rivoluzioni si concludono con la vittoria totale di uno dei due partiti opposti. Potrà mai succedere che quel gruppo affermi che il risultato della sua vittoria è qualcosa di meno di un progresso? Una tale affermazione equivarrebbe più o meno ad ammettere che essi hanno avuto torto e che i loro oppositori avevano ragione. Almeno per essi il risultato della rivoluzione deve costituire un progresso, ed essi sono in una posizione eccellente per assicurarsi che i membri futuri della loro comunità vedranno la storia passata nella stessa prospettiva. Il capitolo XI ha descritto dettagliatamente le tecniche grazie alle quali si ottiene questo risultato, ed abbiamo ora descritto un aspetto, strettamente collegato a quello, della vita scientifica professionale. Quando ripudia un paradigma passato, una comunità scientifica cessa al tempo stesso di considerare come oggetto di studio adatto per la formazione professionale la maggior parte dei libri e degli articoli in cui quel paradigma era stato incorporato. L'educazione scientifica non fa uso di qualcosa che equivalga ad un museo di opere d'arte o a una biblioteca di classici, e la conseguenza di ciò è talvolta una drastica distorsione dell'immagine che lo scienziato si fa della storia passata della sua disciplina. In misura maggiore di quanto facciano coloro che svolgono attività in altri campi creativi, lo scienziato vede il passato della propria disciplina come muoventesi in linea retta verso lo stato attuale. In breve, lo vede come un progresso. Nessuna alternativa gli si offre finché rimane nel campo della sua disciplina.

Inevitabilmente queste osservazioni suggeriranno che colui che appartiene ad una comunità scientifica matura è, come il tipico personaggio del romanzo di Orwell *1984*, la vittima di una storia riscritta da coloro che detengono il potere. Un tale suggerimento

non è del tutto inappropriato. Vi sono sia perdite che guadagni nelle rivoluzioni scientifiche, e gli scienziati tendono ad essere particolarmente ciechi alle prime {147}. D'altra parte, una spiegazione del progresso ottenuto mediante la rivoluzione non può fermarsi a questo punto. Far ciò equivarrebbe a dire che nelle scienze la forza stabilisce ciò che è giusto, formulazione questa che, ancora una volta, non sarebbe del tutto sbagliata se non trascurasse la natura del processo e l'autorità in base della quale vien fatta la scelta fra paradigmi. Se soltanto l'autorità, e particolarmente l'autorità esterna alla professione, fosse l'arbitro dei dibattiti concernenti i paradigmi, l'esito di tali dibattiti potrebbe ancora essere una rivoluzione, ma non sarebbe una rivoluzione scientifica. L'esistenza stessa della scienza dipende dall'affidare il potere di scegliere tra i paradigmi ai membri di una comunità di tipo specifico. Quale specificità debba possedere la comunità perché la scienza possa sopravvivere e crescere, può essere indicato dalla stessa debolezza dell'influenza che l'umanità ha sull'impresa scientifica. Ogni civiltà della quale abbiamo documenti ha posseduto una sua tecnologia, una sua arte, una sua religione, un suo sistema politico, sue proprie leggi, e così via. In molti casi questi aspetti della civiltà erano non meno sviluppati dei nostri. Ma soltanto le civiltà che derivano dalla civiltà ellenica hanno posseduto una scienza non semplicemente rudimentale. Il complesso della conoscenza scientifica è stato prodotto in Europa negli ultimi quattro secoli. In nessun altro luogo né periodo sono sorte queste comunità estremamente specifiche da cui deriva la produttività scientifica.

Quali sono le caratteristiche essenziali di queste comunità? Evidentemente è necessario esaminarle più a fondo. In questa sede è possibile fare soltanto generalizzazioni del tutto provvisorie. Nondimeno, un certo numero di requisiti necessari per appartenere ad un gruppo scientifico professionale deve già essere notevolmente chiaro. Lo scienziato deve, ad esempio, essere interessato a risolvere problemi concernenti il comportamento della natura. Oltre a ciò, sebbene il suo interesse per la natura possa avere una portata globale, i problemi su cui opera debbono essere problemi di dettaglio. Cosa ancor più importante, le soluzioni che lo soddisfano non possono essere puramente personali, ma debbono venire accettate come tali da molti. Il gruppo che le condivide non può essere tuttavia ricavato a

caso dalla società nel suo complesso, ma deve essere, al contrario, la comunità nettamente definita costituita dai colleghi della stessa specializzazione scientifica. Una delle regole più vincolanti della vita scientifica anche se non è scritta, è il divieto di fare appello a capi di stato o alla grande maggioranza del pubblico in questioni scientifiche. Il riconoscimento dell'esistenza di un gruppo di specialisti che sono gli unici competenti e l'accettazione del ruolo di questo gruppo come arbitro esclusivo delle conquiste scientifiche specialistiche comporta ulteriori conseguenze.

I membri del gruppo, come individui e in virtù della loro comune educazione ed esperienza, devono essere considerati come gli unici possessori delle regole del gioco o di qualche criterio equivalente per formulare giudizi inequivocabili. Mettere in dubbio che essi posseggano un criterio comune di valutazione equivarrebbe ad ammettere l'esistenza di criteri diversi e incompatibili per valutare i risultati scientifici. Una simile ammissione solleverebbe inevitabilmente il problema se la verità nelle scienze possa essere una sola.

Questa breve lista delle caratteristiche comuni alle comunità scientifiche è stata ricavata interamente dalla prassi della scienza normale, né sarebbe stato possibile fare altrimenti. Questa prassi è il genere di attività per la quale lo scienziato è di solito addestrato. Si noti però che, nonostante la sua brevità, la lista è già sufficiente a distinguere tali comunità da tutti gli altri gruppi professionali. E si noti, inoltre, che nonostante essa abbia la sua fonte nella scienza normale, la lista spiega molte caratteristiche specifiche della reazione del gruppo durante le rivoluzioni e in particolare durante i dibattiti su paradigmi. Abbiamo già osservato che un gruppo di questo genere deve considerare un mutamento di paradigma come un progresso. Possiamo ora riconoscere che tale percezione è, sotto importanti aspetti, autosoddisfacente. La comunità scientifica è uno strumento straordinariamente efficace per massimizzare il numero e la precisione dei problemi risolti attraverso il mutamento di paradigma.

Poiché l'unità di misura della conquista scientifica è il problema risolto e poiché il gruppo sa bene quali problemi siano già stati risolti, pochi scienziati si lasceranno facilmente persuadere ad adottare un punto di vista che mette di nuovo in discussione molti problemi che sono già stati precedentemente risolti. La natura stessa deve essere la prima a mettere in pericolo

la sicurezza professionale facendo sembrare problematiche le conquiste scientifiche raggiunte in precedenza. Inoltre, anche quando ciò si è verificato ed è sorto un nuovo candidato alla funzione di paradigma, gli scienziati saranno riluttanti ad abbracciarlo, a meno che non siano convinti che vengono rispettate due condizioni fondamentali. Innanzitutto, deve essere evidente che il nuovo candidato risolverà alcuni problemi rilevanti e generalmente riconosciuti come tali, che non possono essere affrontati in nessun altro modo. In secondo luogo, il nuovo paradigma deve permettere di conservare una parte relativamente vasta della concreta capacità di risolvere problemi che la scienza ha ereditato dai paradigmi precedenti. La novità per se stessa non è un *desideratum* nelle scienze, come lo è in tanti altri campi creativi. Di conseguenza, sebbene i nuovi paradigmi posseggano raramente, o quasi mai, tutte le capacità dei loro predecessori, conservano di solito in misura notevole le più concrete conquiste passate, e permettono sempre di ottenere nuove soluzioni concrete di problemi.

Ciò non significa che l'abilità nel risolvere problemi è l'unica o indiscutibile base per la scelta di paradigmi. Abbiamo già sottolineato molte ragioni per cui non vi può essere nessun criterio del genere. Significa invece che una comunità di scienziati specializzati farà tutto il possibile per assicurare la crescita continua dei dati raccolti che essa può elaborare con precisione ed in dettaglio. Nel corso del processo la comunità subirà delle perdite. Spesso alcuni vecchi problemi debbono essere banditi. È inoltre frequente il caso che una rivoluzione restringa la sfera d'interessi della comunità degli specialisti, accresca il grado della loro specializzazione, e facendo così diminuire la loro capacità di comunicare con altri gruppi, sia di scienziati che di profani. Sebbene la scienza si sviluppi sicuramente in profondità, può darsi che essa non cresca al tempo stesso in estensione. Quando questo succede, la crescita in estensione si manifesta principalmente nella proliferazione di specializzazioni scientifiche, piuttosto che all'interno di una singola specializzazione. Tuttavia, nonostante questa e altre possibili perdite, la natura di tali comunità offre una virtuale garanzia che sia la lista dei problemi risolti dalla scienza che la precisione delle soluzioni particolari crescerà continuamente. Per lo meno, la natura della comunità offre una simile garanzia se v'è una qualche sia pur minima possibilità di

offrirla. Quale migliore criterio vi potrebbe essere della decisione del gruppo scientifico?

Questi ultimi paragrafi indicano le direzioni in cui, secondo me, dovrebbe essere cercata una soluzione più raffinata del problema del progresso nelle scienze. Forse essi indicano che il progresso scientifico non è esattamente quello che avevamo stabilito. Ma al tempo stesso mostrano che un certo progresso finirà inevitabilmente col caratterizzare l'impresa scientifica, fin tanto che tale impresa sopravvive. Nelle scienze non si richiede un progresso di altro genere. Per essere più precisi, possiamo vederci costretti ad abbandonare la convinzione, esplicita o implicita, che mutamenti di paradigmi portino gli scienziati, e coloro che ne seguono gli ammaestramenti, sempre più vicino alla verità.

È ora tempo di fare osservare che, fino a queste ultime pagine, il termine 'verità' è apparso in questo saggio soltanto in una citazione di Francesco Bacone. Ed anche in quelle pagine esso compariva soltanto come fonte della convinzione dello scienziato che regole incompatibili di prassi scientifica possono coesistere soltanto in periodi di rivoluzione, quando il compito principale delle comunità degli specialisti è quello di eliminare tutti gli insiemi di regole fatta eccezione per uno solo. Il processo di sviluppo descritto in questo saggio è stato un processo di evoluzione *a partire* da stadi primitivi: un processo i cui stadi successivi sono caratterizzati da una comprensione sempre più dettagliata e raffinata della natura. Ma nulla di ciò che abbiamo detto, o diremo, ne fa un processo di evoluzione *verso* qualcosa. È inevitabile che questa lacuna abbia sorpreso parecchi lettori. Siamo tutti profondamente abituati a vedere la scienza come un'impresa che si avvicina costantemente sempre più ad uno scopo stabilito in anticipo dalla natura.

Ma è poi necessario che esista un tale scopo? Non è possibile render conto sia dell'esistenza della scienza che del suo successo in termini di evoluzione a partire dallo stato delle conoscenze possedute dalla comunità ad ogni dato periodo di tempo? È veramente d'aiuto immaginare che esista qualche completa, oggettiva, vera spiegazione della natura e che la misura appropriata della conquista scientifica è la misura in cui essa si avvicina a questo scopo finale? Se impareremo a sostituire l'evoluzione verso ciò che vogliamo conoscere con l'evoluzione a partire da ciò che conosciamo, nel corso di tale processo, un gran

numero di problemi inquietanti può dissolversi. In mezzo a questi problemi può per esempio trovarsi quello dell'induzione.

Non posso ancora specificare in tutti i suoi particolari le conseguenze di questa concezione alternativa del progresso scientifico. Ma per suo merito possiamo renderà conto che la trasposizione concettuale proposta qui è molto simile a quella che l'Occidente ha subito un secolo fa. Discuterla ora è particolarmente utile, poiché in entrambi i casi l'ostacolo principale che si frappone alla trasposizione è lo stesso. Quando Darwin pubblicò per la prima volta la propria teoria dell'evoluzione per selezione naturale nel 1859, ciò che maggiormente preoccupava molti specialisti non era né il concetto di mutamento di specie né la possibilità che l'uomo discendesse dalla scimmia. Le prove a favore dell'evoluzione, compresa l'evoluzione dell'uomo, erano state accumulate per decenni, e l'idea di evoluzione era stata suggerita e ampiamente diffusa prima d'allora. Sebbene l'evoluzione come tale avesse incontrato resistenze, particolarmente da parte di qualche gruppo religioso, essa non costituiva assolutamente la difficoltà maggiore incontrata dai darwiniani. Questa fu invece sollevata da un'idea che apparteneva più personalmente a Darwin. Tutte le ben note teorie evoluzioniste pre-darwiniane — quelle di Lamarck, di Chambers, di Spencer, e dei *Naturphilosophen* tedeschi — avevano affermato che l'evoluzione era un processo diretto verso uno scopo finale. Si pensava che l'«idea» dell'uomo, della flora e della fauna contemporanee fosse stata presente fin dalla prima creazione della vita, forse nella mente di Dio. Questa idea o questo progetto aveva fornito la direzione e la forza direttrice all'intero processo evolutivo. Ogni nuovo stadio dello sviluppo evolutivo era una realizzazione più perfezionata di un piano che era stato presente fin dall'inizio {148}.

Per molti, l'abolizione di questo tipo teleologico di evoluzione costituiva il suggerimento di Darwin più suggestivo, e meno accettabile {149}. *L'Origine delle Specie* non riconosceva nessuno scopo stabilito da Dio o dalla natura. La selezione naturale invece, operando nell'ambiente dato e sugli organismi effettivamente presenti e a portata di mano, era responsabile della comparsa, graduale ma costante, di organismi più elaborati, maggiormente articolati, e molto più specializzati. Anche organi così meravigliosamente adattati come l'occhio e la mano dell'uomo —

organismi la cui struttura aveva precedentemente fornito potenti argomentazioni a favore dell'esistenza di un supremo artefice e di un piano prestabilito — erano i prodotti di un processo che si era sviluppato costantemente a *partire da* stadi primitivi, ma che non tendeva *verso* nessuno scopo. La teoria secondo cui la selezione naturale, che risultava puramente dalla lotta fra gli organismi per la sopravvivenza, aveva prodotto l'uomo assieme alle forme più alte del regno animale e vegetale, era l'aspetto più difficile e più sconcertante della teoria di Darwin. Che significato potevano avere termini come 'evoluzione', 'sviluppo', e 'progresso', in assenza di uno scopo specifico? A parecchia gente questi termini sembrarono improvvisamente contraddittori.

L'analogia che abbiamo tracciata tra l'evoluzione degli organismi e l'evoluzione delle idee scientifiche può facilmente essere spinta troppo avanti. Ma per quanto riguarda gli argomenti in discussione di questo capitolo conclusivo, l'analogia è quasi perfetta. Il processo descritto nel capitolo XII come soluzione delle rivoluzioni è la scelta della maniera più adatta per praticare la scienza futura, operata attraverso un conflitto che ha luogo all'interno della comunità scientifica.

Il risultato complessivo di una serie, di selezioni rivoluzionarie di questo genere separate da periodi di ricerca normale, è l'insieme meravigliosamente adeguato di strumenti che chiamiamo conoscenza scientifica moderna. Gli stadi successivi di questo processo di sviluppo sono contrassegnati da un incremento dell'articolazione e della specializzazione di tali strumenti. E l'intero processo può aver avuto luogo, come oggi supponiamo si sia verificato per l'evoluzione biologica, senza l'aiuto di un insieme di finalità, o di una verità scientifica stabilita una volta per tutte, della quale ciascuno stadio di sviluppo della conoscenza scientifica costituisca una copia migliore rispetto alla precedente.

Chiunque abbia seguito sin qui le nostre argomentazioni sentirà tuttavia il bisogno di chiedersi che cos'è che spinge avanti il processo evolutivo. Che aspetto deve avere la natura, compreso l'uomo, perché la scienza sia possibile? Perché le comunità scientifiche sono in grado di raggiungere un consenso stabile, irraggiungibile in altri campi? Perché un simile consenso dovrebbe permanere attraverso successivi mutamenti di paradigmi? E perché ogni mutamento di paradigma dovrebbe produrre invariabilmente uno strumento più perfetto sotto ogni

aspetto di quelli conosciuti prima? Da un certo punto di vista, tali questioni, eccettuata la prima, hanno già trovato una risposta. Ma da un altro punto di vista sono ancora aperte come lo erano all'inizio di questo saggio. Non è soltanto la comunità scientifica che deve essere specifica. Anche il mondo, di cui tale comunità fa parte, deve possedere caratteristiche abbastanza specifiche, e non siamo più vicini di quanto lo fossimo all'inizio a conoscere quali debbano essere queste caratteristiche. Il problema: Che aspetto deve avere il mondo perché l'uomo possa conoscerlo? non è stato però creato da questo saggio. Al contrario, esso è vecchio quanto la scienza stessa, e non ha ancora avuto una risposta. Ma non è necessario dargli una risposta in questa sede. Ogni concezione della natura compatibile con la crescita della scienza in virtù di prove è compatibile con la concezione evolutiva della scienza proposta in questo saggio. Poiché questa concezione è compatibile anche con un'osservazione attenta della vita scientifica, vi sono buone argomentazioni a favore del suo impiego nei tentativi fatti per risolvere i numerosi problemi che ancora rimangono aperti.

Note al Testo.

Note alla prefazione

01) Una particolare influenza ebbero ALEXANDRE KOYRÉ, *Etudes galiléennes*, 3 voll., Paris 1939; EMILE MEYERSON, *Identité et réalité*, Paris 1926; HÉLÈNE METZGER, *Les doctrines chimiques en France du début du XVII à la fin du XVIII siècle*, Paris 1923 e *Newton, Stahl, Boerhaave et la doctrine chimique*, Paris 1930; ANNELIESE MAIER, *Die Vorläufer Galileis im 14. Jahrhundert*, in *Studien zur Naturphilosophie der Spätscholastik*, Roma 1949. →

02) Per il fatto che mettevano in luce concetti e processi che emergono anche direttamente dalla storia della scienza, due gruppi di ricerche del Piaget si dimostrarono particolarmente importanti: *The Child's Conception of Causality*, trad. ingl. di Marjorie Gabain, London 1930, e *Les notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant*, Paris 1946. →

03) Gli scritti di Whorf sono stati in seguito raccolti e pubblicati da JOHN B. CARROLL, *Language, Thought, and Reality - Selected Writings of Benjamin Lee Whorf*, New York 1956. Quine ha presentato le sue idee in *Two Dogmas of Empiricism*, ristampato in *From a Logical Point of View*, Cambridge (Mass.) 1953, pp. 20-46. →

04) Questi fattori sono discussi in T. S. KUHN, *The Copernican Revolution: Planetary Astronomy in the Development of Western Thought*, Cambridge (Mass.) 1957, pp. 122-32, 270-71. Altri effetti delle condizioni esterne intellettuali ed economiche sullo sviluppo scientifico in senso stretto sono illustrati nei miei scritti: *Conservation of Energy as an Example of Simultaneous Discovery*, in *Critical Problems in the History of Science*, a cura di Marshall Clagett, Madison (Wis.) 1959, pp. 321-56; *Engineering Precedent for the Work of Sadi Carnot*, «Archives internationales d'histoire des sciences», XIII (1960), pp. 247-51; e *Sadi Carnot and the Cagnard Engine*, «Isis», LII (1961), pp. 567-74. È perciò soltanto riguardo ai problemi discussi in questo saggio che attribuisco ai fattori esterni un ruolo secondario. →

Note al capitolo secondo

05) JOSEPH PRIESTLY, *The History and Present State of Discoveries Relating to Vision, Light, and Colours*, London 1772, pp. 385-90. →

06) VASCO RONCHI, *Storia della luce*, Bologna 1952, capp. I-IV. →

07) DUANE e DUANE H. D. ROLLER, *The Development of the Concept of Electric Charge: Electricity from the Greeks to Coulomb*, «Harvard Case Histories in Experimental Science», Case 8, Cambridge (Mass.) 1954; I. B. COHEN, *Franklin and Newton: An Inquiry into Speculative Newtonian Experimental Science and Franklin's Work in Electricity as an Example Thereof*, Philadelphia 1956, capp. VII-XII. Per alcuni dettagli della analisi contenuta nei paragrafi che seguono sono debitore di un saggio inedito preparato dal mio allievo John L. Heilbron. Una esposizione più estesa e dettagliata dell'emergere del paradigma di Franklin è contenuta nella mia relazione *The Function of Dogma in Scientific Research* presentata al Symposium on the History of Science tenutosi ad Oxford dal 9 al 15 luglio 1961 ed i cui atti sono stati pubblicati, a cura di A. C. CROMBIE, in *Scientific Change: Historical Studies in the Intellectual, Social, and Technical Conditions for Scientific Discovery and Technical Invention, from Antiquity to the Present*, London and New York 1963. →

08) Cfr. l'abbozzo di una storia naturale del calore nel *Novum Organum* di Bacone in *The Works of Francis Bacon*, a cura di J. Spedding, R. L. Ellis e D. D. Heath, New York 1869, vol. VIII, pp. 179-203. →

09) Cfr. D. e D. H. D. ROLLER, *The Development of the Concept of Electric Charge* cit., pp. 14, 22, 28, 43. Soltanto dopo il lavoro citato nell'ultima pagina indicata (p. 43), l'effetto di repulsione viene riconosciuto da tutti come un effetto inequivocabilmente elettrico. →

10) F. BACONE, *Novum Organum* cit., pp. 235, 337, scrive: «L'acqua leggermente tiepida congela più facilmente di quella fredda». Per una parziale esposizione delle fasi iniziali della storia di questa strana osservazione, cfr. MARSHALL CLAGETT, *Giovanni Marliani and Late Medieval Physics*, New York 1941, cap. IV. →

11) Cfr. D. e D. H. D. ROLLER, *The Development of the Concept of Electric Charge* cit., pp. 51-54. →

12) Il caso più difficile da spiegare era quello della repulsione

reciproca di corpi dotati di carica negativa; su di esso cfr. I. B. COHEN, *Franklin and Newton* cit., pp. 491-94, 531-43. →

13) È da notare che l'accettazione della teoria di Franklin non pose termine a tutti i dibattiti. Nel 1759 Robert Symmer propose una versione di quella teoria secondo cui esistevano due fluidi; e per molti anni gli studiosi di elettricità rimasero divisi in due gruppi a seconda che considerassero l'elettricità come consistente in un unico fluido o composta di due fluidi. Ma le discussioni su questo punto non fanno che confermare ciò che abbiamo detto sopra circa il modo in cui una conquista scientifica universalmente riconosciuta riesca ad unificare gli studiosi della disciplina interessata. Gli studiosi dell'elettricità, sebbene rimanessero divisi su questo punto, giunsero rapidamente alla conclusione che nessuna prova sperimentale poteva differenziare le due versioni della teoria e che perciò esse erano da considerarsi equivalenti. A parte ciò, entrambe le teorie erano in grado di utilizzare, come di fatto fecero, tutti i vantaggi che la teoria di Franklin offriva. Cfr. I. B. COHEN, *Franklin and Newton* cit., pp. 543-46, 548-54. →

14) Cfr. F. BACONE, *Novum Organum* cit., p. 210. →

15) La storia dell'elettricità offre un esempio eccellente di cui possiamo trovare riproduzioni nelle biografie scientifiche di Priestley, Kelvin ed altri. Franklin riferisce che Nollet, che verso la metà del secolo era il più autorevole fra gli studiosi di elettricità del continente, «visse fino a rimanere l'ultimo della sua setta, eccettuato il signor B, suo allievo ed immediato discepolo» (*Benjamin Franklin's Memoirs*, a cura di Max Farrand, Berkeley [Calif.] 1949, pp. 384-86). Più interessante, però, è la ostinatezza con cui intere scuole si isolano progressivamente dalla scienza professionale. Si consideri, ad esempio, il caso dell'astrologia, che era stata un tempo parte integrante dell'astronomia. O si consideri la continuazione, alla fine del XVIII ed all'inizio del XIX secolo, di una tradizione, un tempo rispettabile, di chimica «romantica». Questa tradizione viene discussa da CHARLES C. GILLISPIE, *The «Encyclopédie» and the Jacobin Philosophy of Science: A Study in Ideas and Consequences*, in *Critical Problems in the History of Science* cit., pp. 255-89; e dallo stesso autore in *The Formation of Lamarck's Evolutionary Theory*, «Archives internationales d'histoire des sciences», XXXVII (1956) pp. 323-38. →

16) Gli sviluppi dello studio dell'elettricità dopo Franklin comprendono un immenso accrescimento nella sensibilità dei rivelatori di cariche (il primo apparato per misurare cariche su cui si potesse fare affidamento e che fosse diffuso generalmente), l'evoluzione del concetto di capacità e del suo rapporto con una

nozione perfezionata di tensione elettrica e la quantificazione della forza elettrostatica. Su tutti questi punti, cfr. D. e D. H. D. ROLLER, *The Development of the Concepts of Electric Charge* cit., pp. 66-81; W. C. WALKER, *The Detection and Estimation of Electric Charges in the Eighteenth Century*, «Annals of Science», I (1936), pp. 66-100; e EDMUND HOPPE, *Geschichte der Elektrizität*, Leipzig 1884, parte I, capp. III-IV. →

Note al capitolo terzo

17) BERNARD BARBER, *Resistance by Scientists to Scientific Discovery*, «Science», CXXXIV (1961), pp. 596-602. →

18) L'unico duraturo punto di controllo ancora generalmente riconosciuto è la processione del perielio di Mercurio. Lo spostamento verso il rosso nello spettro della luce proveniente da stelle molto lontane può essere derivato da considerazioni più elementari della relatività generale, e lo stesso può essere possibile per l'incurvamento della luce attorno al sole, un punto questo che è ora oggetto di discussione. In ogni caso, le misurazioni di quest'ultimo fenomeno rimangono equivocate. Può darsi che sia stato stabilito molto recentemente un nuovo punto di controllo: lo spostamento gravitazionale della radiazione di Mossbauer. Forse ne verranno presto fuori degli altri in questo campo ora attivo, ma per lungo tempo rimasto inerte. Per un aggiornato e conciso resoconto del problema, cfr. L. I. SCHIFF, *A Report on the NASA Conference on Experimental Tests of Theories of Relativity*, «Physics Today», XIV (1961), pp. 42-48. →

19) Per due esempi di telescopi parallattici, cfr. ABRAHAM WOLF, *A History of Science, Technology, and Philosophy in the Eighteenth Century*, London 1952, pp. 103-5. Per la macchina di Atwood, cfr. N. R. HANSON, *Patterns of Discovery*, Cambridge 1958, pp. 100-2, 207-8. Per gli ultimi due esempi di apparecchiatura specializzata, cfr. M. L. FOUCAULT, *Méthode générale pour mesurer la vitesse de la lumière dans l'air et les milieux transparents. Vitesses relatives de la lumière dans l'air et dans l'eau...*, «Comptes Rendus... de l'Académie des sciences», XXX (1850), pp. 551-60; e C. L. COWAN JR. ed altri, *Detection of the Free Neutrino: A Confirmation*, «Science», CXXXIV (1956), pp. 103-4. →

20) J. H. P[oynting] elenca un paio di dozzine di misurazioni della costante gravitazionale effettuate tra il 1741 ed il 1901, in *Gravitation Constant and Mean Density of the Earth*, in *Encyclopaedia*

21) Per la completa trasposizione dei concetti dell'idrostatica nel campo della pneumatica, cfr. i due trattati di Pascal sull'equilibrio dei liquidi e sulla pesantezza dell'aria, i quali rappresentano uno sviluppo del parallelismo originariamente introdotto da Torricelli con l'osservare che «viviamo sommersi sul fondo di un oceano costituito di aria». →

22) Cfr. D. e D. H. D. ROLLER, *The Development of the Concept of Electric Charge* cit., pp. 66-80. →

23) Per esempio, cfr. T. S. KUHN, *The Function of Measurement in Modern Physical Science*, «Isis», LII (1961), pp. 161-93. →

24) T. S. KUHN, *The Caloric Theory of Adiabatic Compression*, «Isis», XLIX (1958), pp. 132-40. →

25) A. WOLF, *A History of Science, Technology, and Philosophy in the Eighteenth Century* cit., pp. 75-81, 96-101; e WILLIAM WHEWELL, *History of the Inductive Sciences*, London 1847, vol. II, pp. 213-71. →

26) RENÉ DUGAS, *Histoire de la mécanique*, Neuchâtel 1950, capp. IV-V. →

Note al capitolo quarto

27) Le frustrazioni prodotte dal conflitto tra il ruolo dell'individuo e lo schema generale dello sviluppo scientifico possono essere talvolta molto serie. Su questo argomento, cfr. LAWRENCE S. KUBIE, *Some Unsolved Problems of the Scientific Career*, «American Scientist» XLI (1953), pp. 596-613; XLII (1954), pp. 104-12. →

28) Per una breve esposizione dello sviluppo di questi esperimenti, cfr. la conferenza di C. J. Davisson in *Les prix Nobel en 1937*, Stockholm 1938, P. 4. →

29) W. WHEWELL, *History of the Inductive Sciences* cit., vol. II, pp. 101-5, 220-22. →

30) Devo questa citazione a W. O. Hagstrom, la cui ricerca in sociologia della scienza combacia talvolta con la mia. →

31) Per questi aspetti del newtonianesimo, cfr. I. B. COHEN, *Franklin and Newton* cit., cap. VII, particolarmente pp. 255-57, 275-77. →

32) Questo esempio è discusso con ampiezza verso la fine del cap. X. →

33) H. METZGER, *Les doctrines chimiques en France du début du XVII à la fin du XVIII siècle* cit., pp. 359-61; MARIE BOAS, *Robert Boyle and Seventeenth Century Chemistry*, Cambridge 1958, pp. 112-15. →

34) L. KONIGSBERGER, *Hermann von Helmholtz*, trad. ingl. di Francis A. Welby, Oxford 1906, pp. 65-66. →

35) JAMES E. MEINHARD, *Chromatography: A Perspective*, «Science», ex (1949), pp. 387-92. →

36) Per le teorie corpuscolati in generale, cfr. MARIE BOAS, *The Establishment of the Mechanical Philosophy*, «Osiris», X (1952), pp. 412-541. Per i loro effetti sulla chimica di Boyle, cfr. T. S. KUHN, *Robert Boyle and Structural Chemistry in the Seventeenth Century*, «Isis», XLIII (1952), pp. 12-36. →

Note al capitolo quinto

37) Michael Polanyi ha sviluppato brillantemente un tema molto simile, argomentando che gran parte della riuscita di uno scienziato dipende da una «conoscenza tacita», cioè da una conoscenza che è stata acquisita attraverso la pratica e che non può venire articolata esplicitamente. Cfr. il suo *Personal Knowledge*, Chicago 1958, in particolare i capp. V e VI. →

38) LUDWIG WITTGENSTEIN, *Philosophical Investigations*, a cura di G. E. M. Arscombe, New York 1953, pp. 31-36. Wittgenstein, però, non dice quasi nulla circa il genere di mondo necessario per giustificare il procedimento di dare dei nomi da lui sottolineato. Parte dei punti che seguono non possono perciò essergli attribuiti. →

39) Per la chimica, cfr. H. METZGER, *Les doctrines chimiques en France du début du XVII à la fin du XVIII siècle* cit., pp. 24-27, 146-49;

M. BOAS, *Robert Boyle* cit., cap. II. Per la geologia, cfr. WALTER F. CANNON, *The Uniformitarian-Catastrophist Debate*, «Isis», LI (1960), pp. 38-55; e CHARLES C. GILLISPIE, *Genesis and Geology*, Cambridge (Mass.) 1951, capp. IV-V. →

40) Per le controversie sorte a proposito della meccanica quantistica, cfr. JEAN ULLMO, *La crise de la physique quantique*, Paris 1950, cap. II. →

41) Per la meccanica statistica, cfr. RENÉ DUGAS, *La théorie physique au sens de Boltzmann et ses prolongements modernes*, Neuchâtel 1959, pp. 158-184, 206-19. Per l'accoglimento riservato all'opera di Maxwell, cfr. MAX PLANCK, *Maxwell's Influence in Germany* in *James Clerk Maxwell: A Commemoration Volume, 1831-1931*, Cambridge 1931, pp. 45-65; e SILVANUS P. THOMPSON, *The Life of William Thomson Baron Kelvin of Largs*, London 1910, vol. II, pp. 1021-27. →

42) Per un esempio che illustra la battaglia con gli aristotelici, cfr. ALEXANDRE KOYRÉ, *A Documentary History of the Problem of Fall from Kepler to Newton*, «Transactions of the American Philosophical Society», XLV (1955), pp. 329-95. Per i dibattiti coi cartesiani e con i leibniziani, cfr. PIERRE BRUNET, *L'introduction des théories de Newton en France au XVIII siècle*, Paris 1931; e ALEXANDRE KOYRÉ, *From the Closed World to the Infinite Universe*, Baltimore 1957, cap. XI. →

43) Il ricercatore qui menzionato fu James K. Senior, cui debbo la comunicazione verbale dell'episodio. Alcune questioni relative a questo punto sono trattate nel suo saggio *The Vernacular of the Laboratory*, «Philosophy of Science», XXV (1958), pp. 163-68. →

Note al capitolo sesto

44) Per una discussione, che rimane ancora classica, della scoperta dell'ossigeno, cfr. A. N. MELDRUM, *The Eighteenth-Century Revolution in Science - the First Phase*, Calcutta 1930, cap. V. Un recente ed indispensabile panorama comprendente un resoconto della controversia circa la priorità si trova in MAURICE DAUMAS, *Lavoisier, théoricien et expérimentateur*, Paris 1955, capp. II-III. Per una discussione e una informazione bibliografica più completa, cfr. anche T. S. KUHN, *The Historical Structure of Scientific Discovery*, «Science», CXXXVI, 1 giugno 1962, pp. 760-64. →

45) Cfr. però UNO BOCKLUND, *A Lost Letter from Scheele to Lavoisier*, «Lychnos», 1957-58, pp. 39-62, ove il ruolo di Scheele viene valutato diversamente. →

46) JAMES B. CONANT, *The Overthrow of the Phlogiston Theory; The Chemical Revolution of 1775-1789*, «Harvard Case Histories in Experimental Science», Case 2, Cambridge (Mass.) 1950, p. 23. Questo utile opuscolo ristampa parecchi documenti sull'argomento. →

47) HÉLÈNE METZGER, *La philosophie de la matière chez Lavoisier*, Paris 1935, e M. Daumas, *Lavoisier cit.*, cap. VII. →

48) L'esposizione più autorevole dell'origine della insoddisfazione di Lavoisier si trova in HENRY GUERLAC, *Lavoisier - the Crucial Year: The Background and Origin of His First Experiments on Combustion in 1772*, Ithaca (N. Y.) 1961. →

49) L. W. TAYLOR, *Physics, the Pioneer Science*, Boston 1941; T. W. CHALMERS, *Historic Researches*, London 1949, pp. 218-19. →

50) E. T. WHITTAKER, *A history of the Theories of Aether and Electricity*, London 1951, vol. I, p. 358, nota 1. Sir George Thomson mi ha portato a conoscenza di un secondo colpo mancato. Anche Sir William Crookes, avendo notato un inspiegabile annebbiamento su una lastra fotografica, era sul punto di fare la scoperta. →

51) S. P. THOMPSON, *The Life of William Thomson cit.*, vol. II, p. 1125. →

52) J. B. CONANT, *The Overthrow of the Phlogiston Theory cit.*, pp. 18-20. →

53) K. K. DARROW, *Nuclear Fission*, «Bell System Technical Journal», XIX (1940), pp. 267-89. Sembra che il cripto, uno dei due più importanti prodotti della fissione, non sia stato identificato chimicamente fino a che la reazione non fu spiegata completamente. Il bario, l'altro prodotto, fu identificato quasi alla fase finale della ricerca, perché questo elemento era stato aggiunto alla soluzione radioattiva allo scopo di precipitare l'elemento pesante che i chimici nucleari stavano cercando. L'impossibilità di separare il bario aggiunto da quello prodotto nel processo radioattivo portò infine, dopo che la reazione era stata studiata continuamente per quasi cinque anni, alla seguente dichiarazione: «Come chimici, dovremmo essere indotti da questa ricerca... a cambiare tutti i nomi dello

schema della reazione che precede e scrivere, così, Ba, La, Ce invece di Ra, Ac, Th. Ma come “chimici nucleari” con stretti legami con la fisica, non possiamo avventurarci in questo salto nel buio, che ci farebbe trovare in contraddizione con tutti gli esperimenti precedenti della fisica nucleare. Può darsi che per una serie di strani incidenti il nostro risultato sia illusorio» (OTTO HAHN e FRITZ STRASSMAN, *Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle*, «Die Naturwissenschaften», XXVII [1939], p. 15).
→

54) Per le diverse fasi che portarono alla bottiglia di Leyda, cfr. I. B. COHEN, *Franklin and Newton* cit., pp. 385-86, 400-6, 452-67, 506-7. L'ultima fase è descritta da E. T. WHITTAKER, *A History of the Theories of Aether and Electricity* cit., pp. 50-52. →

55) J. S. BRUNER e LEO POSTMAN, *On the Perception of Incongruity: A Paradigm*, «Journal of Personality», XVIII (1949), pp. 206-23. →

56) J. S. BRUNER e LEO POSTMAN, *On the Perception of Incongruity* cit., pagina 218. Il mio collega Postman mi dice che, sebbene egli conoscesse in anticipo il materiale e il metodo di presentazione delle carte, trovava nondimeno profondamente disagiata guardare le carte anomale. →

Note al capitolo settimo

57) A. R. HALL, *The Scientific Revolution, 1500-1800*, London 1954, p. 16. →

58) MARSHALL CLAGETT, *The Science of Mechanics in the Middle Ages*, Madison (Wis.) 1959, parti II-III. A. Koyré ha messo in evidenza numerosi elementi medievali nel pensiero di Galileo nei suoi *Etudes galiléennes* cit., particolarmente nel vol. I. →

59) Per Newton cfr. T. S. KUHN, *Newton's Optical Papers*, in *Isaac Newton's Papers and Letters in Natural Philosophy*, a cura di I. B. Cohen, Cambridge (Mass.) 1958, pp. 27-45. Sulle ricerche che preparavano alla teoria ondulatoria, cfr. E. T. WHITTAKER, *A History of the Theories of Aether and Electricity* cit., vol. I, pp. 94-109; e W. WHEWELL, *History of the Inductive Sciences* cit., vol. II, pp. 396-466. →

60) Sulla termodinamica cfr. S. P. THOMPSON, *The Life of William*

Thomson cit., vol. I, pp. 266-81. Sulla teoria quantistica cfr. FRITZ REICHE, *The Quantum Theory*, trad. di H. S. Hatfield e H. L. Brose, London 1922, capp. I-II. →

61) J. L. E. DREYER, *A History of Astronomy from Thales to Kepler*, a New York 1953, capp. XI-XII. →

62) T. S. KUHN, *The Copernican Revolution* cit., pp. 135-43. →

63) J. R. PARTINGTON, *A Short History of Chemistry*, London 1951, pp. 48-51» 73-85, 90-120. →

64) Una notevole quantità di materiale su questo argomento si trova sparso qua e là nei lavori di J. R. PARTINGTON e D. MCKIE (*Historical Studies on the Phlogiston Theory*, «Annals of Science», II [1937], pp. 361-404; III [1938], pp. 1-58, 337-71; IV [1939], pp. 337-71), benché il loro interesse principale sia rivolto ad un periodo leggermente posteriore. →

65) H. GUERLAC, *Lavoisier* cit.; l'intero volume documenta lo sviluppo ed il primo riconoscimento della crisi. Si veda in particolare a p. 35 la chiara presentazione della situazione cui Lavoisier si trovò di fronte. →

66) MAX JAMMER, *Concepts of Space: The History of Theories of Space in Physics*, Cambridge (Mass.) 1954, pp. 114-24 [trad. it., Milano 1961]. →

67) JOSEPH LARMOR, *Aether and Matter... Including a Discussion of the Influence of the Earth's Motion on Optical Phenomena*, Cambridge 1900, pp. 6-20, 320-22. →

68) K. T. GLAZEBROOK, *James Clerk Maxwell and Modern Physics*, London, 1896, cap. IX. L'atteggiamento finale assunto da Maxwell è espresso nel suo *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford 1892 p. 470. →

69) Sul ruolo svolto dall'astronomia nello sviluppo della meccanica cfr. T. S. KUHN, *The Copernican Revolution* cit., cap. VII. →

70) E. T. WHITTAKER, *A History of the Theories of Aether and Electricity* cit., vol. I, pp. 386-410; II, London 1953, pp. 27-40. →

71) Sull'opera di Aristarco, cfr. T. L. HEATH, *Aristarchus of Samos*:

The Ancient Copernicus, Oxford 1913, parte II. Una severa formulazione dell'atteggiamento tradizionale circa l'oblio in cui fu lasciata l'intuizione di Aristarco, cfr. ARTHUR KOESTLER, *The Sleepwalkers: A History of Man's Changing Vision of the Universe*, London 1959, p. 50. →

72) J. R. PARTINGTON, *A Short History of Chemistry* cit., pp. 78-85.
→

Note al capitolo ottavo

73) Questo punto viene discusso particolarmente da N. R. HANSON, *Patterns of Discovery* cit., pp. 99-105. →

74) T. S. KUHN, *The Essential Tension: Tradition and Innovation in Scientific Research*, in The Third (1959) University of Utah Research Conference on the Identification of Creative Scientific Talent, a cura di Calvin W. Taylor, Salt Lake City 1959, pp. 162-77. Per il fenomeno analogo riguardante gli artisti, cfr. FRANK BARRON, *The Psychology of Imagination*, «Scientific American», CXCIX (settembre 1958), pp. 151-66 e in particolare p. 160. →

75) W. WHEWELL, *History of the Inductive Sciences* cit., vol. II, pp. 220-21. →

76) Sulla velocità del suono cfr. T. S. KUHN, *The Caloric Theory of Adiabatic Compression*, «Isis», XLIV (1958), pp. 136-37. Per lo spostamento secolare del perielio di Mercurio, cfr. E. T. WHITTAKER, *A History of the Theories of Aether and Electricity* cit., vol. II, pp. 151, 179. →

77) Citato in T. S. KUHN, *The Copernican Revolution* cit., p. 138. →

78) ALBERT EINSTEIN, *Autobiographical Note*, in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, a cura di P. A. Schilpp, Evanston (Ill.) 1949, p. 45. →

79) ROLPH KRONIG, *The Turning Point, in Theoretical Physics in the Twentieth Century: A Memorial Volume to Wolfgang Pauli*, a cura di m. Fierz e V. F. Weisskopf, New York 1960, pp. 22, 25-26. Gran parte di questo articolo descrive la crisi verificatasi nella meccanica quantistica negli anni immediatamente precedenti il 1925. →

80) HERBERT BUTTERFIELD, *The Origins of Modern Science, 1300-1800*, London 1949, pp. 1-7 [trad. it. Bologna 1962]. →

81) N. R. HANSON, *Patterns of Discovery* cit., cap. I. →

82) Per una esposizione delle ricerche di Keplero su Marte, cfr. J. L. E. DREYER, *A History of Astronomy* cit., pp. 380-93. Nonostante alcune imprecisioni, il riassunto di Dreyer fornisce il materiale che qui ci interessa. Per Priestley, cfr. i suoi *Experiments and Observations on Different Kinds of Air*, London 1774-75. →

83) Per il contrappunto filosofico che accompagnò la meccanica del XVII secolo, cfr. RENÉ DUGAS, *La mécanique au XVII siècle*, Neuchâtel 1954, specialmente il cap. XI. Per l'analogo fenomeno verificatosi nel XIX secolo vedi l'opera precedente dello stesso autore, *Histoire de la mécanique* cit., pp. 419-43. →

84) T. S. KUHN, *A Function for Thought Experiments*, in *Mélanges Alexandre Koyré*, a cura di R. Taton e I. B. Cohen, Paris 1964, vol. II, pp. 307-334» →

85) Sulle nuove scoperte ottiche in generale, cfr. V. RONCHI, *Storia della luce* cit., cap. VII. Per una spiegazione più antica di uno di questi effetti, cfr. J. PRIESTLEY, *The History and Present State* cit., pp. 498-520. →

86) A. EINSTEIN, *Autobiographical Note* cit. →

87) Questa generalizzazione sul ruolo della giovinezza nella ricerca scientifica fondamentale è così comune da essere diventata un cliché. Inoltre, basterà dare un'occhiata ad una lista qualsiasi di contributi alla teoria scientifica per averne una conferma superficiale. Tuttavia la generalizzazione esige una ricerca sistematica, HARVEY C. LEHMAN, *Age and Achievement*, Princeton 1953, fornisce molti dati utili; ma questo studio non tenta di isolare i contributi che implicano una rielaborazione dei concetti fondamentali, né indaga circa le specifiche circostanze, se mai ve ne siano state, che possono accompagnare una produzione scientifica relativamente tarda. →

88) S. P. THOMPSON, *The Life of William Thomson* cit., vol. I, pp. 266-81. →

89) Si vedano, ad esempio, le osservazioni di P. P. WIENER in «*Philosophy of Science*», XXV (1958), p. 298. →

90) J. B. CONANT, *Overthrow of the Phlogiston Theory* cit., pp. 13-16; e J. R. PARTINGTON, *A Short History of Chemistry* cit., pp. 85-88. L'esposizione più completa e comprensiva e simpatetica delle conquiste realizzate dalla teoria del flogisto si trova in H. METZGER, *Newton, Stahl, Boerhaave et la doctrine chimique* cit., parte II. →

91) Confronta le conclusioni raggiunte attraverso una analisi completamente diversa da R. B. BRAITHEWAITE, *Scientific Explanation*, Cambridge 1953, pp. 50-87 e in particolare p. 76. →

92) Sul corpuscolarismo in generale, cfr. M. BOAS, *The Establishment of the Mechanical Philosophy* cit., pp. 412-541. Per l'effetto della forma delle particelle sul gusto, cfr. *ibid.*, p. 483. →

93) R. DUGAS, *La mécanique au xvii siècle* cit., pp. 177-85, 284-98, 345-56. →

94) I. B. COHEN, *Franklin and Newton* cit., capp. VI-VII. →

95) Per l'elettricità cfr. I. B. COHEN, *Franklin and Newton* cit., capp. VIII-IX; per la chimica cfr. H. METZGER, *op. cit.*, parte I. →

96) E. MEYERSON, *Identité et réalité*, Paris 1926, cap. X. →

97) E. T. WHITTAKER, *A History of the Theories of Aether and Electricity* cit., vol. II, pp. 28-30. →

98) Per un tentativo brillante e assolutamente aggiornato di fare entrare lo sviluppo scientifico nel suo letto di Procuste, cfr. CHARLES C. GILLISPIE, *The Edge of Objectivity: An Essay in the History of Scientific Ideas*, Princeton 1960. →

Note al capitolo decimo

99) Gli esperimenti originali furono fatti da GEORGE M. STRATTON,

Vision without Inversion of the Retinal Image, «Psychological Review», IV (1897), pp. 341-60, 463-81. Una rassegna più aggiornata è offerta da HARVEY A. CARR, *An Introduction to Space Perception*, New York 1935, pp. 18-57. →

100) Per esemplificazioni, cfr. ALBERT H. HASTORF, *The Influence of Suggestion on the Relationship between Stimulus Size and Perceived Distance*, «Journal of Psychology», xxix (1950), pp. 195-217; e JEROME S. BRUNER, LEO POSTMAN e JOHN RODRIGUES, *Expectations and the Perception of Color*, «American Journal of Psychology», LXIV (1951), pp. 216-27. →

101) N. R. HANSON, *Patterns of Discovery* cit., cap. I. →

102) PETER DOIG, *A Concise History of Astronomy*, London 1950, pp. 115-16. →

103) RUDOLPH WOLF, *Geschichte der Astronomie*, Munchen 1877, pp. 513- 515, 683-93. Si noti in particolare come l'esposizione di Wolf renda difficile spiegare queste scoperte come conseguenze della legge di Bode. →

104) JOSEPH NEEDHAM, *Science and Civilization in China*, vol. III, Cambridge 1959, pp. 423-29, 434-36. →

105) T. S. KUHN, *The Copernican Revolution* cit., pp. 206-9. →

106) D. e D. H. D. ROLLER, *The Development of the Concept of Electric Charge* cit., pp. 21-29. →

107) Si veda la discussione del cap. VII e la letteratura cui rinvia la citazione bibliografica della nota a p. 96. →

108) GALILEO GALILEI, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, nella edizione nazionale delle *Opere*, vol. VIII, pp. 128-29, 205-8. →

109) Ibid., pp. 138-41. →

110) M. CLAGETT, *The Science of Mechanics in the Middle Ages* cit., pp. 537-38, 570. →

111) J. HADAMARD, *Subconscient intuition, et logique dans la recherche scientifique* (*Conférence faite au Palais de la Découverte, le*

8 Décembre 1945), pp. 7-8. Una esposizione molto più completa, sebbene limitata esclusivamente alle innovazioni matematiche, è offerta dallo stesso autore in *The Psychology of Invention in the Mathematical Field*, Princeton 1949. →

112) T. S. KUHN, *A Function for Thought Experiments* cit. →

113) A. KOYRÉ, *Etudes galiléennes* cit., vol. I, pp. 46-51; e dello stesso autore, *Galileo and Plato*, «Journal of the History of Ideas», IV (1943), pp. 400-428. →

114) T. S. KUHN, *A Function for Thought Experiments* cit. →

115) A. KOYRÉ, *Études galiléennes* cit., vol. II, pp. 7-11. →

116) M. CLAGETT, op. cit., capp. IV, VI e IX. →

117) N. GOODMAN, *The Structure of Appearance*, Cambridge (Mass.) 1951, pp. 4-5. Vale la pena di citare il passo più estesamente: «Se tutti gli individui abitanti a Wilmington nel 1947 che pesano fra 78 e 80 chili, e solo essi, hanno i capelli rossi, allora “gli individui abitanti a Wilmington nel 1947 con capelli rossi” e “gli individui abitanti a Wilmington nel 1947 che pesano fra 78 e 80 chili” possono essere riuniti in una definizione strutturale... Il problema se “potrebbe esserci stato” qualche individuo al quale si potesse attribuire uno di questi predicati, ma non un altro, non esiste... dal momento che abbiamo determinato che persone di questo tipo non esistono... È una fortuna che non ci siano problemi del genere, dato che il concetto di caso “possibile”, cioè di casi che non esistono, ma che avrebbero potuto esistere, è molto poco chiaro». →

118) H. METZGER, *Newton, Stahl, Boerhaave et la doctrine chimique* cit., pp. 34-68. →

119) H. METZGER, *Newton, Stahl, Boerhaave et la doctrine chimique* cit., pp. 124-29, 139-48. Su Dalton, cfr. LEONARD K. NASH, *The Atomic-Molecular Theory*, «Harvard Case Histories in Experimental Science», Case 4, Cambridge (Mass.) 1950, pp. 14-21. →

120) J. R. PARTINGTON, *A Short History of Chemistry* cit., pp. 161-63. →

121) A. N. MELDRUM, *The Development of the Atomic Theory, I: Berthollet's Doctrine of Variable Proportions*, «Manchester Memoirs»,

122) LEONARD K. NASH, *The Origins of Dalton's Chemical Atomic Theory*, «Isis», XLVII (1956), pp. 101-16. →

123) A. N. MELDRUM, *The Development of the Atomic Theory, VI: The Reception Accorded to the Theory Advocated by Dalton*, «Manchester Memoirs», lv (1911), pp. x-10. →

124) Su Proust, cfr. A. N. MELDRUM, *Berthollet's Doctrine of Variable Proportions* cit., p. 8. La storia dettagliata dei gradualisti mutamenti avvenuti nel modo di determinare la composizione chimica ed i pesi atomici non è ancora stata scritta, ma J. R. PARTINGTON, *A Short History of Chemistry* cit., fornisce utili suggerimenti in proposito. →

Note al capitolo undicesimo

125) LEONARD K. NASH, *The Origins of Dalton's Chemical Atomic Theory* cit., pp. 101-16. →

126) Sul commento fatto da Newton, cfr. l'edizione dei *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World*, curata da F. Cajori, Berkeley (Calif.) 1946, p. 21; il passo newtoniano andrebbe messo a confronto con la discussione galileiana della Giornata Terza dei *Discorsi e dimostrazioni matematiche*. →

127) T. S. KUHN, *Robert Boyle* cit., pp. 26-29. →

128) M. BOAS (nel suo *Robert Boyle* cit.), tratta in molti punti dei contributi positivi dati da Boyle allo sviluppo del concetto di elemento chimico. →

Note al capitolo dodicesimo

129) Per una breve delineazione delle vie principali che portano a teorie probabilistiche della verificaione, cfr. ERNEST NAGEL, *Principles of the Theory of Probability* vol. I, n. 6 della *International Encyclopedia of Unified Science*, pp. 60-75» →

130) K. R. POPPER, *The Logic of Scientific Discovery*, New York 1959, in particolare capp. I-IV. →

131) Sulle reazioni dei profani al concetto di spazio curvo, cfr. PHILIPP FRANK, *Einstein, His Life and Times*, a cura di G. Rosen e S. Kusaka, New York 1947, pp. 142-46. Su alcuni tentativi fatti per conservare i vantaggi della relatività generale all'interno di uno spazio euclideo, cfr. C. NORDMANN, *Einstein and the Universe*, trad. di J. McCabe, New York 1922, cap. IX. →

132) T. S. KUHN, *The Copernican Revolution* cit., capp. III, IV, e VII. Il tema fondamentale di questo libro è la discussione degli aspetti per cui l'eliocentrismo era qualcosa di più di una questione strettamente astronomica. →

133) M. JAMMER, *Concepts of Space* cit., pp. 118-24. →

134) I. B. COHEN, *Franklin and Newton* cit., pp. 93-94. →

135) CHARLES DARWIN, *On the Origin of Species...* (ristampa della 6° ed. inglese, New York 1889), vol. II. pp. 295-96. →

136) MAX PLANCK, *Scientific Autobiography and Other Papers*, trad. di F. Gayor, New York 1949, pp. 33-34. →

137) Sul ruolo del culto del sole nel pensiero di Keplero, cfr. E. A. BURTT, *The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science*, New York 1932, pp. 44-49. →

138) Il seguente aneddoto getta luce sull'importanza del ruolo svolto dalla reputazione: Lord Rayleigh, quando la sua reputazione era ormai consolidata, presentò alla British Association un articolo concernente alcuni paradossi dell'elettrodinamica. Il suo nome fu inavvertitamente ommesso quando l'articolo fu spedito e l'articolo stesso venne in un primo tempo respinto come opera di qualche «buontempone». Poco dopo, col nome dell'autore al suo posto, l'articolo venne accettato con grande profusione di scuse. Cfr. R. J. STRUTT, *John William Strutt, Third Baron Rayleigh*, New York 1924, p. 228. →

139) Sui problemi creati dalla meccanica quantistica, cfr. F. REICHE, *The Quantum Theory* cit., capp. II, VI-IX. Sugli altri esempi citati in questo paragrafo, vedi i riferimenti bibliografici contenuti nelle note precedenti di questo capitolo. →

140) T. S. KUHN, op. cit., pp. 219-25. →

141) E. T. WHITTAKER, *A History of the Theories of Aether and Electricity* cit., vol. I, p. 108. →

142) Ibid., vol. II, pp. 151-80 sullo sviluppo della relatività generale. Sulla reazione di Einstein all'accordo esatto della teoria col movimento osservato del perielio di Mercurio, si veda la lettera citata in ALBERT EINSTEIN cit., a cura di P. A. Schilpp, p. 101. →

143) Sul sistema di Brahe, che geometricamente era del tutto equivalente a quello di Copernico, cfr. J. L. E. DREYER, *A History of Astronomy* cit., pp. 359-71. Sulle ultime versioni della teoria del flogisto e sul loro successo, cfr. J. R. PARTINGTON e D. MCKIE, *Historical Studies of the Phlogiston Theory*, «Annals of Science», IV (1939), pp. 113-49. →

144) Sul problema presentato dall'idrogeno, cfr. J. R. PARTINGTON, *A Short History of Chemistry* cit., p. 134. Sull'ossido di carbonio, cfr. H. KOPP, *Geschichte der Chemie*, Braunschweig 1845, vol. III, pp. 294-96. →

Note al capitolo tredicesimo

145) E. H. GOMBRICH, *Art and Illusion: A study in the Psychology of Pictorial Representation*, New York 1960, pp. 11-12. →

146) E. H. GOMBRICH, *Art and Illusion* cit., p. 97; e GIORGIO DE SANTILLANA, *The Role of Art in the Scientific Renaissance*, in *Critical Problems in the History of Science* cit., pp. 33-65. →

147) Gli storici della scienza spesso si imbattono in forme particolarmente notevoli di cecità di questo genere. Il gruppo di studenti provenienti da facoltà scientifiche è spesso quello che trae maggior profitto dal loro insegnamento; ma è anche di solito quello che dà le maggiori frustrazioni all'inizio. Poiché gli studenti di scienze «conoscono le risposte esatte», è particolarmente difficile insegnar loro ad analizzare una scienza del passato nei termini che le sono propri. →

148) LOREN EISELEY, *Darwin's Century: Evolution and the Men*

Who Discovered It, New York 1958, capp. II, IV-V. →

149) Per un resoconto particolarmente acuto di una importante battaglia di Darwin su questo problema cfr. A. HUNTER DUPREE, *Asa Gray*, 1810-1888, Cambridge (Mass.) 1959, pp. 295-306, 355-83. →

Questo ebook è stato impaginato da:
Blutaski

